

**О.В. Сушко, Е.К. Посвятенко,  
С.В. Кюрчев, С.І. Лодяков**

# **ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**Мелітополь, 2019**

УДК 621.7(072)

П 75

*Рекомендовано Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного університету як підручник для студентів вищих навчальних закладів освіти України (№7 від 26.02.2019 р.)*

**Рецензенти:**

**Волкогон Володимир Михайлович** – доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, зав. лабораторією інструментального матеріалознавства Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України;

**Антонюк Віктор Степанович** – доктор технічних наук, професор кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

**Авторський колектив:**

П75

Сушко О.В., Посвятенко Е.К., Кюрчев С.В., Лодяков С.І.

**Прикладне матеріалознавство:** підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації / Авт. колектив: Сушко О.В., Посвятенко Е.К., Кюрчев С.В., Лодяков С.І. – Мелітополь: ТПЦ «Forward press», 2019. – 352 с.: іл.

ISBN

У підручнику викладено основи матеріалознавства, розглянуті фактори, які зумовлюють роль матеріалів у забезпеченні надійності та довговічності виробів. Наведені: реальна будова матеріалів, види дефектів та їх вплив на властивості матеріалів, надані критерії оцінки конструктивної міцності. Описані процеси, що відбуваються при кристалізації рідких металів, наведені діаграми фазової рівноваги, методи їх побудови. Розглянуті теорії та технології різноманітних видів термічної обробки, класифікація та маркування вуглецевих та легованих сталей, чавунів, сплавів на основі кольорових металів, порошкових, неметалевих та композиційних матеріалів та їх використання в різних галузях.

Для підготовки студентів в аграрних вищих навчальних закладах III - IV рівнів акредитації з напрямів «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва», «Енергетика та енергетичні системи в АПК», «Обладнання переробних і харчових виробництв». Може бути корисним магістрам, аспірантам, науковим працівникам в галузі матеріалознавства.

УДК 621.7(072)

ISBN

© Сушко О.В., Посвятенко Е.К.,  
Кюрчев С.В., Лодяков С.І., 2019



## ПЕРЕДМОВА

При складанні підручника втілювалася мета – надати підручник з матеріалознавства для студентів всіх механічних спеціальностей навчальних закладів III – IV рівнів акредитації стосовно до програм тих напрямків підготовки, для яких теоретичні (металографічні) відомості даються у скороченому вигляді та головна увага приділяється ознайомленню з конкретними технічними сплавами.

У відповідності до цього підручник має деякі особливості стосовно викладеного матеріалу: теорія сплавів доведена до мінімуму; розглядання типів діаграм стану обмежується переважно подвійними сплавами; при вивченні конкретних сплавів наведені фактичні данні про їх властивості та використання. Що стосується теорій процесів та явищ, які спостерігаються в сплавах, автори намагалися навести найбільш відомі та загальноприйняті тлумачення та якнай докладніше дотримуватись стандартів, зокрема термінологічних, які сьогодні діють в Україні, враховуючи при цьому терміни, усталені в літературі з матеріалознавства.

Підручник складено на основі багаторічного дидактичного досвіду авторів, опублікованих ними раніше підручників, посібників та наукових праць. Основний курс викладений в п'ятнадцяти розділах. До них зроблені доповнення про вплив властивостей матеріалів на надійність машин і механізмів, а також надані основні принципи класифікації та маркування сплавів за кордоном.

Для кращого засвоєння студентами теоретичних знань, які є основою при вирішенні практичних питань, пов'язаних з отриманням необхідних властивостей деталей машин різного призначення, кожен розділ підручника завершується контрольними питаннями.

Автори висловлюють глибоку подяку рецензентам за критичні зауваження та поради, які були враховані під час редагування підручника.

## ВСТУП

Матеріалознавство – наука, яка встановлює взаємозв'язок між хімічним складом, структурою, властивостями матеріалів та вивчає закономірності їх зміни під впливом зовнішніх причин: теплових, хімічних, механічних, електромагнітних, радіоактивних та ін. Без знання матеріалів та методів досягнення необхідних властивостей для кожної конкретної деталі залежно від умов її експлуатації, впровадження в життя будь-якої науково-технічної розробки неможливе. Тому матеріалознавство є однією з базових дисциплін, яка формує рівень знань сучасного інженера.

Техніка, що розвивається дуже швидко та потужно у всіх напрямках, ставить до матеріалознавців все більш високі вимоги. Наприклад, машинобудівна промисловість не могла би вдосконалюватися, якщо б до послуг конструкторів не було самих різноманітних за якістю матеріалів, які володіють дуже різними властивостями. Тому розвиток будь-якої країни вимагає постійного удосконалення тих матеріалів, що вже існують, створення нових, дешевших та кращих за властивостями матеріалів, а також пошуку найефективніших методів виготовлення виробів та поліпшення їх характеристик.

Більшість деталей автомобілів, тракторів та інших механізмів зазнають при роботі значних статичних, динамічних та циклічних навантажень, які викликають руйнування виробів. Багато спряжених деталей зношуються в умовах як рідкого тертя, так і тертя без змащення, деякі деталі схильні до корозійно-механічного зношування.

На даний час у процесі виробництва та експлуатації найрізноманітнішої техніки використовуються біля шести тисяч різних матеріалів: сталей, чавунів, кольорових металів (у тому числі алюмінієві, магнієві, титанові, мідні та ін.). Все більш широке застосування отримують порошкові та неметалеві матеріали. Останні включають великий асортимент пластмас, волокон, гуми, клеїв та герметиків, а також скла, ситалів, кераміки тощо.

Мета даного підручника – надати студентам знання, які допоможуть їм з найменшими витратами часу навчитися обґрунтовано вибирати матеріал та спосіб обробки для конкретних деталей, а також вирішувати задачі підвищення якості та надійності виробів.

Весь матеріал тем, що вивчаються, представлений у вигляді інформації, що потребує операційного опрацювання, до кожного розділу надані питання для самостійного рішення.

## РОЗДІЛ 1

### АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА І КРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ

#### 1.1 Короткий історичний огляд

Металознавство – наука, яка вивчає склад, атомно-будову та властивості металів і сплавів, а також закономірності зміни їх властивостей під впливом теплової, механічної або хімічної дії. Знання теоретичних засад металознавства дає змогу глибше зрозуміти процеси ливарного та зварювального виробництва, обробки металів тиском та різанням. Правильний вибір матеріалу для деталей машин, механізмів та конструкцій, створення нових, більш досконалих сплавів, які забезпечують зниження маси і габаритів машин та приладів, підвищення їх експлуатаційної надійності та довговічності залежать від знань з металознавства.

Як самостійна наука металознавство виникло в Росії в 19 столітті під назвою «металографія». Її виникнення зумовлено розвитком промисловості й, насамперед, металургії та машинобудування. Кристалами речовин вчені цікавилися ще в XVII – XVIII століттях. М.В. Ломоносов в 1763 р. у своєму «Трактаті о слоях земных» встановив закон постійності кутів для кристалів алмазу. Геометрично правильну форму кристалів різних речовин Ломоносов пов'язував із певним розміщенням атомів у просторі.

Вперше сталь як сплав заліза та вуглецю досліджував у 1799 р. французький вчений Гюстон де Морво. У 1802 р. Девід Мюзет дослідив, що сталь містить 0,8-2 % С, а чавун – 4-6 % С.

Розвиток металознавства нерозривно пов'язаний з іменем П.П. Аносова (1797-1851 р.р.), який вперше застосував мікроскоп для дослідження структури металів. П.П. Аносов заклав основу науки про сталі, розробив наукові принципи виробництва високоякісної сталі, розкрив секрет виготовлення булатної сталі (який був загублений). Клинки з цієї сталі мали високу твердість і в'язкість, ними можна було рубати цвяхи, не зіпсувавши леза, розсікати в повітрі тонку хустку; клинки можна було згинати до зіткнення кінців.

Перші спроби дослідити та сфотографувати травлені шліфи під мікроскопом зробили англійський вчений Генрі-Кліфтон Сорбі у 1864 р. та німецький вчений А. Мартенс у 1878 р.

Д.К.Чернов (1838-1921 р.р.) відкрив критичні точки сталі (1868 р.) і кристалічну структуру литої сталі (1878 р.). Відкриття Д.К.Черновим критичних точок дало можливість пояснити ряд явищ при термічній обробці сталей.

М.С. Курнаков (1860-1941 р. р.) розробив методи фізико-хімічного аналізу сплавів. О.О. Байков (1870-1946 р. р.) висвітлив фізико-хімічну сутність ряду металургійних процесів. С.С. Штейнберг (1872-1940 р. р.) узагальнив явища перетворень аустеніту при різних температурах. М.П.Чижевський (1873-1952 р.р.) вперше вивчив вплив азоту на властивості сталі.

Слід відмітити англійських металофізиків В.Ріда, Ж.Фріда, К.Сміта, Р.Канна, Т.Гранта, Р. Аустена, Юм-Розері, Дж. Блейкмора та ін., Ф. Осмонда, А. Портевена, Ле-Шательє (Франція), П. Геренса, Таммана (Німеччина), а також американських вчених відомих своїми науковими роботами в області кристалізації металів Г. Гоу, Ф. Тейлора, М. Уайта і канадського вченого Г.Гіббса в дослідженнях закономірностей умов рівноваги систем (так званий Закон правила фаз) та ін.

## 1.2 Загальна характеристика металів

З усіх відомих у теперішній час елементів більше половини є металами.

Що ж таке метали? Біля 300 років тому М.В. Ломоносов у своїй праці «Первые основания металлургии или рудных дел» дав таке визначення: «Металлы – суть ковкие блестящие тела».

Метали в твердому й частково у рідкому станах володіють рядом характерних властивостей:

- високою тепло- та електропровідністю;
- позитивними температурним коефіцієнтом електроопору; з підвищенням температури електроопір чистих металів зростає; велика кількість металів має надпровідність; у цих металів при температурі, близької до абсолютного нуля, електроопір падає стрибкоподібно до дуже малої величини;
- термоелектронною емісією, тобто здатністю випускати електрони при нагріванні;
- доброю відбиваючою здатністю; метали непрозорі та мають специфічний металевий блиск;
- підвищеною здатністю до пластичної деформації.

Наявність таких властивостей характеризує так званий металевий стан речовини.

Неметали (металоїди), як правило, крихкі, не мають специфічного металевого блиску та характеризуються низькою тепло- та електропровідністю та негативним коефіцієнтом електроопору.

Всі метали та металеві сплави – тіла кристалічні. Атоми (іони) розташовані в них закономірно та періодично на відміну від аморфних тіл, у яких атоми розташовуються без визначеного порядку (хаотично).

Теорія металевого становища розглядає метал як речовину, що складається з великого числа атомів, в яких позитивно заряджені іони оточені негативно зарядженими частками – електронами, слабо зв'язаними з ядром. Електрони безперервно переміщуються усередині металу і належать усій сукупності атомів. Тому інколи застосовують термін – електронний газ. Легке переміщення електронів усередині металу та малий їх зв'язок з атомами обумовлює визначні металеві властивості (висока електропровідність і теплопровідність, металевий блиск, пластичність та ін.).

### 1.3 Класифікація та основні властивості металів

Метали ділять на дві групи: чорні та кольорові.

*Чорні метали* мають темно-сірий колір, більш високі температури плавлення. Значну твердість і щільність, здатні до поліморфних перетворень (крім Ni). За класифікацією О.П. Гуляєва серед них розрізняють:

- залізні – залізо (Fe), кобальт (Co), нікель (Ni), марганець (Mn);
- тугоплавкі – вольфрам (W), ванадій (V), титан (Ti), молібден (Mo) та ін.;
- уранові – уран (U), плутоній (Pu), торій (Th) та ін.;
- рідкоземельні – лантан (La), церій (Ce), неодим (Nd), празеодим (Pr) та ін.;
- лужноземельні – натрій (Na), калій (K), кальцій (Ca), літій (Li) та ін.

Для *кольорових металів* характерні забарвлення, висока пластичність, низька твердість, відносно низька температура плавлення. Це:

- легкі – берилій (Be), магній (Mg), алюміній (Al);

- благородні – срібло (Ag), золото (Au), метали платинової групи (платина (Pt)), паладій (Pd), іридій (Ir), родій (Rh), осмій (Os), рутеній (Ru), напівблагородна мідь (Cu);

- легкоплавкі – цинк (Zn), ртуть (Ag), олово (Sn), свинець (Pb), вісмут (Bi), талій (Tl), сурма (Sb);

- елементи з послабленими металевими властивостями – галій (Ga), германій (Ge).

Залежно від умов роботи деталей до матеріалу, з якого виготовлено деталь, ставлять різні вимоги. Матеріал повинен мати певні фізичні, хімічні, технологічні та експлуатаційні властивості.

*Фізичні* властивості: густина, теплоємність, питома вага, температура плавлення, теплопровідність, коефіцієнт розширення, магнітні властивості та ін.

*Хімічні* властивості: корозійна стійкість, стійкість металу проти окислення і розчинення в різних середовищах та при різних температурах, здатність до утворення хімічних сполук тощо.

*Технологічні* властивості зумовлюють можливість виготовлення деталей за певною технологією при забезпеченні найкращої якості та наявності найменших відходів металу. До них відносяться пластичність, ковкість, здатність оброблятися різанням, зварюваність, ливарні властивості та ін.

*Експлуатаційними* називають властивості, які впливають на поведінку виробу в процесі його експлуатації. Їх поділяють на дві групи – загальні та спеціальні.

Властивості, що враховуються для будь-яких виробів незалежно від умов експлуатації, називають *загальними*. До них належать стандартні *механічні* властивості, які визначаються випробуваннями матеріалів відповідно до державних стандартів: міцність, пластичність, пружність, ударна в'язкість, твердість.

*Міцність* – це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією навантажень. До характеристик міцності відносяться границя міцності та текучості, які визначаються у результаті руйнування зразків під час статичних випробувань на спеціальних розривних машинах. Найчастіше проводять випробування на розтяг, рідше – на стискання, згин або кручення.

*Пластичністю* називається здатність металу змінювати свою форму під дією зовнішніх навантажень не руйнуючись. Характеристиками є відносне видовження та відносне звуження.

Відносне звуження точніше відображає пластичні властивості металу, ніж відносне видовження.

*Пружність* характеризує здатність тіла відновлювати свою форму після зняття навантажень.

*Ударною в'язкістю КС* називається здатність тіла не руйнуватися під дією динамічних (ударних) навантажень. Вона визначається відношенням затраченої роботи руйнування при ударному зламі до площі поперечного перерізу зразка. В залежності від форми концентратора нанесеного на зразок розрізняють три типи позначень ударної в'язкості – *KCU, KCV, KCT*.

*Твердістю* називають здатність матеріалу чинити опір пластичній деформації при проникненні в нього більш твердого тіла, яке пластично не деформується.

*Спеціальні експлуатаційні властивості* є визначальними лише в певних умовах експлуатації, до них належать зносостійкість, жаростійкість, жароміцність, корозійна стійкість і т. ін.

#### 1.4 Атомно-кристалічна будова металів

Усяка речовина може бути у трьох агрегатних станах – твердому, рідкому і газоподібному (рис. 1.1).

У *газі* немає закономірного розташування часток (атомів, молекул), частки хаотично рухаються, відштовхуються одна від одної і газ прагне зайняти найбільший об'єм.

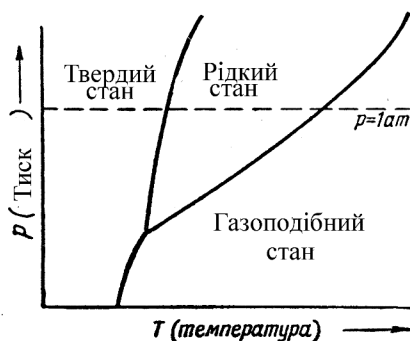


Рис. 1.1. Зони твердого, рідкого та газоподібного стану в залежності від температури та тиску

У *рідині* частки (атоми, молекули) зберігають так званий близький порядок, тобто у просторі закономірно розташована невелика кількість атомів, а не атоми усього об'єму. Близький порядок нестійкий, він то виникає, то зникає під дією теплових коливань.

У *твердому тілі* порядок розташування атомів визначений, закономірний, сили взаємного притягання та відштовхування врівноважені, і

тверде тіло зберігає свою форму.

Правильне, закономірне розташування часток (атомів, молекул) у просторі характеризує кристалічний стан. Тому в фізиці кристалічний стан і твердий стан – синоніми.

Перехід із твердого у рідкий стан, та з рідкого у твердий (так само, як з газоподібного у рідкий) відбувається при визначеній температурі і супроводжується різкою зміною властивостей.

Метали – кристалічні тіла і багато їх властивостей пояснюються саме їх кристалічною будовою. Кристалічну будову можна подати у вигляді просторової кристалічної ґратки, у вузлах якої розташовані атоми.

Гіпотеза про те, що у кристалах розташування атомів закономірне, була висунута давно (Е.С. Федоров, 1860 р.), але тільки після відкриття рентгенівських променів Макс фон Лауе, Вальтер Фрідріх та Пауль Кніппінг (1912 р.) встановили, що кристал – це тримірна періодична ґратка.

### 1.5 Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри

Речовини у твердому стані мають кристалічну або аморфну будову. В ідеальній кристалічній речовині атоми розташовані за геометрично правильною схемою і на певній відстані один від одного, в аморфній (склі, каніфолі) – атоми розташовані безладно.

За сучасними уявленнями усі метали та їх сплави складаються з кристалів. У результаті дослідження будови кристалів за допомогою рентгенівських променів встановлено, що кристали складаються з атомів, розміщених у певному порядку, на певній відстані один від одного так, що вони становлять правильну геометричну форму.

Площини, проведені через точки розміщення атомів, утворюють кристалічну або просторову ґратку (рис. 1.2).

Під елементарною кристалічною коміркою розуміється найменший комплекс атомів, який при багаторазовому повторенні в просторі дозволяє відтворити просторову кристалічну ґратку.

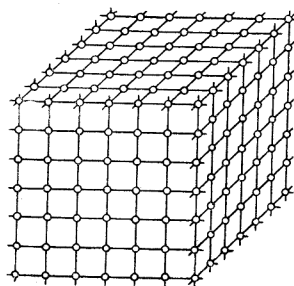


Рис. 1.2. Просторова кристалічна ґратка



Прагнення атомів металу зайняти місця, найбільш близькі одне до одного, приводить до утворення ґраток наступних найпоширеніших типів:

- кубічна об'ємноцентрована (ОЦК) – в якій атоми розташовані у вершинах (вузлах) і один – у центрі куба (рис. 1.3, а). Таку кристалічну ґратку мають *P, K, Na, Li, Ta, W, V* та інші метали;

- кубічна гранецентрована (ГЦК) з розміщенням атомів у вузлах і в центрі кожної грані куба (рис. 1.3, б). Кристалічну ґратку такого типу мають *Ce, Pb, Ni, Pd, Pt, Ir, Cu* та інші метали;

- гексагональна щільно-упакована (ГЦУ), в якій атоми розташовані у вершинах шестикутної призми, три атоми – на середині її висоти і по одному атому в центрі її основи (рис. 1.3, в). Таку ґратку мають *Mg, Cd, Re, Os, Zn, Be* та інші метали.

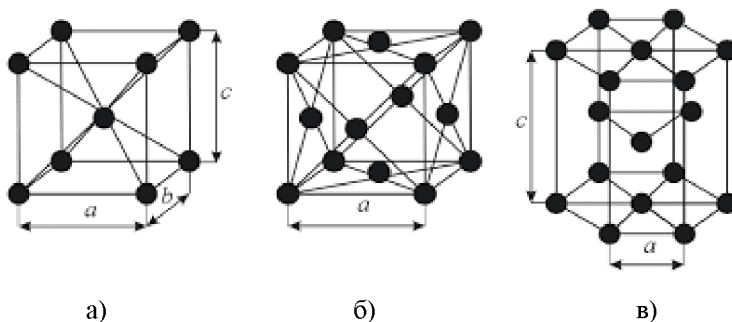


Рис. 1.3. Схематичне зображення ґраток

а) кубічна об'ємноцентрована; б) кубічна гранецентрована;  
в) гексагональна щільного упакування

Найменша відстань між сусідніми атомами вздовж координатних осей ґратки називається *періодом (параметром) ґратки*. Відстань між атомами металів в кристалічній ґратці вимірюється у нанометрах – нм ( $10^{-9}$  м). Наприклад, для Al  $a = 0,404$  нм, для Cr  $a = 0,288$  нм.

В кубічній ґратці періоди по трьох осях рівні ( $a = b = c$ ). В деяких випадках (домішки, легування, деформація) кубічна ґратка може перетворюватись на тетрагональну ( $a = b \neq c$ ).

Густина упакування – відношення об'єму, зайнятого атомами, до об'єму ґратки ( $GU = \frac{V_{\text{ат}}}{V_{\text{ат}}}$ ) ;  $GU_{\text{ОЦК}} = 0,68$ ;  $GU_{\text{ГЦК}}$  та  $GU_{\text{ГЦУ}} = 0,74$ .

Базис ґратки – число атомів, які припадають на одну елементарну комірку (так, для елементарної кубічної ґратки – 1 атом, ОЦК – 2 атоми, ГЦК – 4 атоми, ГЦУ – 6 атомів).

Існують метали, які при певних температурах змінюють форму (тип) кристалічної ґратки. Властивість речовин існувати в кількох кристалічних формах називається *поліморфізмом (алотропією)*. Кристалічні форми, в яких може існувати метал, називаються поліморфними модифікаціями. Вони позначаються літерами грецького алфавіту ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ).

Перехід речовини з однієї модифікації до іншої під впливом зовнішніх умов (температури, тиску) називають поліморфним перетворенням, а температуру, при якій відбувається цей процес – температурою поліморфного перетворення.

Метали, яким притаманний поліморфізм називають поліморфними. До них належать *Fe, Ti, Sn, Co, Mn, W* та інші.

Перехід від одного типу ґратки до іншого супроводжується зміною властивостей, хоча хімічний склад в процесі перетворення залишається незмінним. Тому використання явища поліморфізму дозволяє керувати властивостями виробів та лежить в основі термічної обробки. Внаслідок поліморфного перетворення в твердій речовині утворюються нові кристали. Це називається вторинною кристалізацією. Такий вид кристалізації спостерігається в поліморфних металах та сплавах, а також при зміні розчинності якогось елемента в кристалічній ґратці матеріалу та виділення з нього нових кристалів.

## 1.6 Будова реальних кристалів. Дефекти кристалічної будови

Кристали металів звичайно мають невеликі розміри. Тому металічний виріб складається з великого числа кристалів (по іншому, зерен, або кристалітів). Подібна будова називається полікристалічною.

Властивості зерна у різних напрямках неоднакові. Якщо взяти велике зерно, вирізати з нього кілька однакових за розміром, але по різному орієнтованих зразків і випробувати їх властивості, то ми

можемо спостерігати дуже значну різницю у властивостях зразків (наприклад, при випробуванні зразків, вирізаних з кристалу міді, відносно видовження змінювалось в межах від 10 до 55 %, а межа міцності – від 14 до 35 кгс/мм<sup>2</sup>).

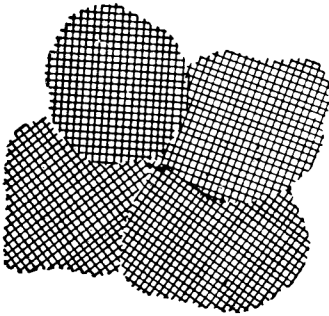


Рис. 1.4. Приклад полікристалічного тіла

Цю властивість металів називають анізотропією (неоднаковість властивостей кристала в залежності від напрямку випробувань).

Реальний метал складається з багатьох кристалів. Різне орієнтування кожного кристала припускає, що у будь-якому напрямку (для зразку металу) розташовується приблизно однакова кількість різноорієнтованих кристалів. Тому властивості такого полікристалічного тіла однакові в усіх напрямках і таке явище називається квазіізотропією (уявною ізотропією).

Завдяки рентгеноструктурному аналізу можна підрахувати параметри кристалічної ґратки. Від параметра ґратки залежать сили міжатомного притягіння. Знаючи параметр, можна підрахувати теоретично міцність металу.

В ідеальному кристалі ґратка не має жодних дефектів кристалічної будови, тобто відхилень від упорядкованого розташування атомів. В реальному ж металі завжди існують дефекти, які за геометричними ознаками поділяються на точкові, лінійні та поверхневі.

**Точковими** називають дефекти, розмір яких у всіх напрямках співмірний із розмірами атомів. До цих дефектів належать *вакансії* (1 – вільні вузли в кристалічній ґратці, де немає атомів); *міжвузлові атоми основного металу* (2); *атоми домішок* (3) (рисунк 1.5, а). Навколо точкових дефектів кристалічна ґратка завжди спотворена за рахунок зміщення сусідніх атомів з рівноважних положень. В чистому металі точкові дефекти майже не змінюють механічних властивостей, але вони суттєво впливають на фізичні характеристики (наприклад, електричні, магнітні). Наявність вакансій зумовлює можливість дифузії в металах.

З підвищенням температури концентрація вакансій значно зростає, що сприяє прискоренню дифузійних процесів.

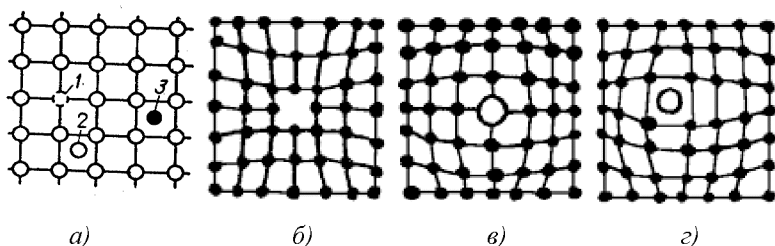


Рис. 1.5. Точкові дефекти кристалічної ґратки

*a* (1), *б* – вакансії; *a* (2), *з* – міжвузлові атоми; *a* (3), *в* – атоми домішок

У сплавах домішкові атоми впливають не тільки на фізичні, але й на механічні процеси, що буде розглянуто нижче.

**Лінійними** називають дефекти, розмір яких в двох напрямках співмірний з розмірами атомів, а в третьому може бути значним. Такі дефекти називають *дислокаціями*. Дислокації – це порушення правильності кристалічної будови матеріалу, обумовлені наявністю зайвої атомної площини або заміщенням однієї площини відносно іншої.

На рис. 1.6, *a* показано так звану *крайову* дислокацію, яка являє собою край «зайвої» кристалографічної півплощини (екстра-площини). Найбільш спотворена частина кристала знаходиться

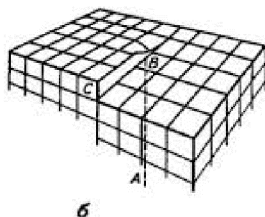
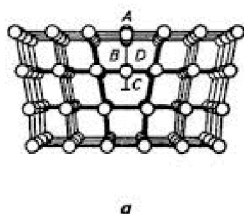


Рис. 1.6. Схеми крайової (*a*) та гвинтової (*б*) дислокацій у кристалічній ґратці металу

навколо краю екстра-площини. Це ядро дислокації – циліндр, віссю якого є дислокаційна лінія – ланцюжок атомів, що лежать на краю екстраплощини.

Кількість дислокацій в кристалі характеризується *густиною дислокацій* (загальна довжина дислокаційних ліній в одиниці об'єму матеріалу,  $\text{см}/\text{см}^3$  або  $\text{см}^{-2}$ ).

При іншому характері зміщення томів може утворитися складніша дислокація – *гвинтова*, рис. 1.6, б.

*Поверхневі* дефекти мають значний розмір у двох напрямках, у третьому ж він співмірний з розмірами атомів. До них належать різного роду *границі*, що відокремлюють одну ділянку кристала від іншої.

Оскільки особливістю металів і сплавів є полікристалічна будова, реальний полікристалічний метал складається з великої кількості зерен, кожне з яких має свою орієнтацію кристалічної ґратки.

*Границя зерна* – це поверхня, з усіх сторін від якої кристалічні ґратки відрізняються орієнтацією, що зумовлює порушення правильності кристалічної будови в цих місцях. Розорієнтація кристалічних ґраток по різні боки від границі і є причиною утворення поверхневих дефектів.

Кожне зерно поділяється на *субзерна* (фрагменти), які утворюють *субструктуру*. Субзерна складаються з блоків мозаїки, які містять близько 30-40 кристалічних ґраток. Таким чином, до поверхневих дефектів належать границі блоків, субзерен та зерен.

До об'ємних дефектів належать скупчення точкових дефектів, що утворюють пори, а також вкраплення іншої фази.

Наявність дефектів у будові ґратки веде до значної зміни властивостей металу. Відомо, наприклад, що мала міцність металів зумовлюється, головним чином, легкою рухливістю дислокацій. Звідси випливає, що підвищення міцності металів можна досягти або ліквідацією дислокацій, або підвищенням опору їх переміщенню. Взаємодія дислокацій між собою або з іншими дефектами кристалічної будови утруднює їх переміщення і тим самим зміцнює метал. Тому при певній кількості дефекти вже не ослаблюють метал, а, навпаки, утруднюють деформацію, підвищують його міцність. Це відбувається, наприклад, при обробці металів тиском, куванням, коли кількість дефектів у них зростає з  $10^4$  -  $10^6$  до  $10^{10}$  -  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Останнім часом були виготовлені практично бездислокаційні зразки металів у вигляді ниткоподібних кристалів – “вусів” довжиною до 10 мм і діаметром 2-10 мкм майже теоретичної міцності: залізних – 13000 Мн/м<sup>2</sup> (1300 кг/мм<sup>2</sup>); мідних – близько 8000 Мн/м<sup>2</sup> (800 кг/мм<sup>2</sup>); цинкових – 2250 Мн/м<sup>2</sup> (225 кг/мм<sup>2</sup>). Міцність цих самих металів,

отриманих у звичайних умовах, становить відповідно 300, 250 і 180 Мн/м<sup>2</sup> (30, 25 і 18 кг/мм<sup>2</sup>).

Вперше уяви про дислокації були запроваджені у 1934 році фізиками Орованом, Полянї та Тейлором для описання атомного механізму ковзання при пластичній деформації як спроба пояснити велику різницю між теоретичною і практичною міцністю металів. У наш час отримані прямі докази існування дислокацій. Дислокації можна побачити, розглядаючи кристали металів на електронному мікроскопі при збільшенні до 40000 - 50000 разів.

## 1.7 Основи теорії кристалізації

### *Термодинамічні основи процесу кристалізації*

*Кристалізацією* називається процес переходу металу з рідкого в твердий стан, коли в металі формується кристалічна ґратка.

У природі усі довільні перетворення, що протікають і, отже,

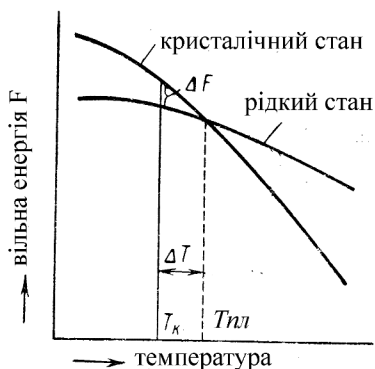


Рис. 1.7. Графік зміни вільної енергії рідкого та твердого станів у залежності від температури

кристалізація та плавлення обумовлені тим, що новий стан у нових умовах виявляється більш стійким, володіє меншим запасом енергії. Чим більша вільна енергія системи, тим система менш стійка, і, коли є можливість, то система переходить у стан, де вільна енергія ( $F$ ) менша. При температурі  $T_{nl}$  вільна енергія металу в твердому  $F_{тв}$  і рідкому  $F_p$  станах однакова.

Нижче цієї температури менший запас вільної енергії має твердий метал, тому тут він стійкіший від рідкого, при температурі, вищій за  $T_{nl}$  – навпаки. Отже, процес кристалізації може розвинутиись тільки тоді, коли є різниця вільних енергій  $\Delta F = F_p - F_{тв} > 0$ , тобто при переохолодженні металу до нижчої, ніж рівноважна, температури  $T_k$  (температури кристалізації).

При температурі  $T_{пл}$  не може відбуватися процес кристалізації (плавлення), тому що при цій температурі вільна енергія рідкого стану ( $F_p$ ) дорівнює вільній енергії твердого стану ( $F_{тв}$ ). Для початку кристалізації необхідно, щоб процес супроводжувався зменшенням вільної енергії системи, а це можливо лише тоді, коли рідина буде охолоджуватися нижче температури плавлення ( $T_{пл}$ ).

Температура, при якій практично починається кристалізація, називається фактичною температурою кристалізації ( $T_k$ ).

Різниця між температурою  $T_{пл}$  і  $T_k$ , при якій відбувається процес кристалізації, називається *ступенем переохолодження*  $\Delta T$ .

$$n = \Delta T = T_{пл} - T_k.$$

### *Схема процесу кристалізації за Д. К. Черновим*

У 1878 році Д.К.Чернов виявив, що процес кристалізації складається з двох процесів: утворення зародків кристалів та їх росту. Ці дві стадії здійснюються одночасно: кристали, що утворилися першими, підростають, а нові – утворюються.

Первинна форма кристалів залежить від типу кристалічної ґратки і може бути кубічною, шестикутною, призмо подібною. З розвитком кристалізації зародки розростаються, виникає зіткнення, що сприяє втраті правильної геометричної форми. Кристали довільної форми, що утворилися після завершення кристалізації, називаються зернами, або кристалітами. Стадії зародження і росту кристалів, які закінчуються утворенням зерен, схематично показані на рис. 1.8.

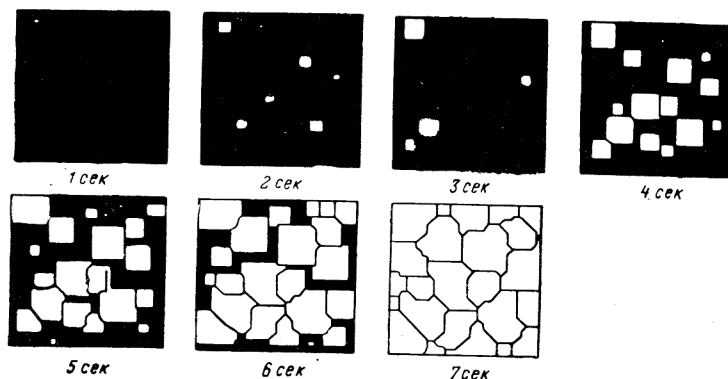


Рис. 1.8. Схема кристалізації рідкого металу

Саме з зародків ростуть потім первинні, або головні, вісі наступних кристалів. Слідом за головними й перпендикулярно до них ростуть вісі другого порядку, а до них – вісі вищих порядків. Такі первинні деревоподібні кристали мають назву *дендритів* (від грецького слова – “дендрон” – дерево). Така форма кристалів пояснюється тим, що зародки в рідкому металі ростуть, головним чином, у напрямі з мінімальною відстанню між атомами (рис. 1.9).

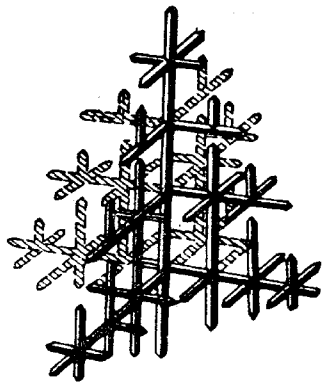


Рис. 1.9. Схема дендриту

В усадочній раковині 100-тонного зливка Д.К.Чернов знайшов дендрит довжиною 39 см. Подальший ріст дендритів у зливку та формування повнотілих кристалів відбувається за рахунок рідкого металу, що заповнює міжвісьовий об’єм. Зростаючи, кристали просуваються назустріч один одному, стикаються між собою, перешкоджаючи росту кожного, внаслідок чого набирають випадкової зовнішньої форми. Такі кристали називають *зернами*.

Розмір і форма зерна при первинній кристалізації залежать від багатьох факторів: температури нагрівання рідкого металу, часу витримки при цій температурі, способу заливки металу у форму, температури тощо. При швидкому охолодженні утворюються дрібні зерна, при вільному охолодженні метал матиме крупнозернисту структуру. При швидкому і однобічному охолодженні утворюються зерна, які мають видовжену форму.

Утворення зародків характеризується швидкістю зародження центрів кристалізації, ріст зародків – швидкістю їх росту.

*Швидкість зародження* – кількість зародків, які утворилися в одиниці об’єму за одиницю часу (кількість центрів (к. ц.),  $1/\text{мм}^3 \text{ с}$ ).

*Швидкість росту* – збільшення лінійних розмірів зростаючого кристала за одиницю часу (ш. р.), мм/с.

Тамман, вивчаючи процес кристалізації, встановив залежність кількості центрів кристалізації (к. ц.) та швидкості росту кристалів (ш. р.) у залежності від ступеня переохолодження ( $n = \Delta T$ ), який, у свою



чергу, залежить від швидкості охолодження рідкого металу в процесі кристалізації.

При малих ступенях переохолодження утворюються небагаточислені великі кристали і при більших ступенях переохолодження утворюється велика кількість дрібних кристалів, тому що збільшення ступеня переохолодження викликає бурхливий ріст кристалів, а вони, розростаючись одночасно, обмежують розміри один одного.



Рис. 1.10. Швидкість росту кристалів і швидкість зародження центрів кристалізації у залежності від ступеню переохолодження

Якщо дуже сильно переохолоджувати рідкий метал, то швидкість росту кристалів і кількість центрів кристалізації стають рівними нулю, і рідкий метал не кристалізується. Утворюється аморфне тіло. Для металів, які володіють малою схильністю до переохолодження, експериментально виявляються тільки висхідні гілки кривих швидкості росту і кількості центрів.

Поряд із ступенем переохолодження на розмір зерна впливає також температура розливання металу, його хімічний склад і, особливо, наявність в ньому домішок, які стають джерелами зародків кристалів.

На виробництві при виготовленні виливків з чорних та кольорових металів широко застосовують процес штучного регулювання розмірів і форми зерен. Для цього у рідкий метал додають у вигляді дрібного порошку спеціальні речовини (алюміній, титан, цирконій, ванадій, магній, хром, кремній). Ці дрібні частки порошку збільшують

кількість центрів кристалізації, завдяки чому метал після кристалізації має дрібнозернисту структуру. Такі речовини називають *модифікаторами*, а процес – *модифікацією*.

Так, для модифікації чавуну застосовують порошок магнію (0,3 - 1,2 % від ваги виливка). З модифікованого чавуну виготовляють, наприклад, гільзи циліндрів двигунів внутрішнього згоряння. Ці речовини не змінюють практично хімічного складу металу, проте поліпшують механічні властивості металу.

### *Ліквация при кристалізації*

Кристалізація металу чи сплаву супроводжується *ліквациєю* – неоднорідним розподілом елементів, що входять до сплаву, в об'ємі металу. Розрізняють дендритну, зональну та гравітаційну ліквацию, або ліквацию за густиною (питомою вагою). Ліквация звичайно погіршує властивості матеріалу, тому її намагаються усунути або запобігти виникненню.

*Дендритна ліквация* – неоднорідність хімічного складу між дендритними осями, які кристалізуються раніше, та міжосьовими зонами, що кристалізуються останніми при нижчих температурах, і тому збагачені шкідливими домішками, що окричують метал. Усувають таку ліквацию спеціальною термічною обробкою.

*Зональна ліквация* – неоднорідність хімічного складу в різних зонах виливків, яка утворюється в умовах повільного охолодження. Елементами, які найбільш схильні до ліквации в сталях та чавунах, є сірка, фосфор, вуглець. Зональну ліквацию неможливо усунути термічною обробкою, для її запобігання прискорюють кристалізацію.

*Гравітаційна ліквация* утворюється в сплавах кольорових металів, які містять елементи з густиною, яка сильно відрізняється. При повільному охолодженні кристалики важких елементів опускаються в нижню частину виливка, а верхня частина містить легкі елементи. Зменшити таку ліквацию можна перемішуванням рідкого сплаву та прискоренням кристалізації.

## **1.8 Будова сталевого зливка**

Вперше будова сталевого зливка була дана Д.К. Черновим у 1878 році.

У зовнішній дрібнозернистій зоні (1) метал, стикаючись із холодними стінками виливниці, внаслідок великої швидкості

охладження переохолоджується, що веде до виникнення великої кількості центрів кристалізації (зародків), рис. 1.11. Розростаючись, ця велика кількість зародків обмежує ріст один одного. Тому зовнішня зона дрібнозерниста.

У другій зоні умови твердіння металу змінюються, швидкість охолодження зменшується, а відведення тепла стає спрямованим (перпендикулярним до стінок форми). Тому кристали набирають стовпчастого вигляду.

Третя зона формується в умовах рівномірного охолодження рідкого металу. Центри кристалізації зароджуються вільно і ростуть без певного напрямку. Утворюється зона рівноосних кристалів.

Оскільки в процесі кристалізації об'єм рідкого металу зменшується, у верхній частині зливка утворюється усадкова раковина.

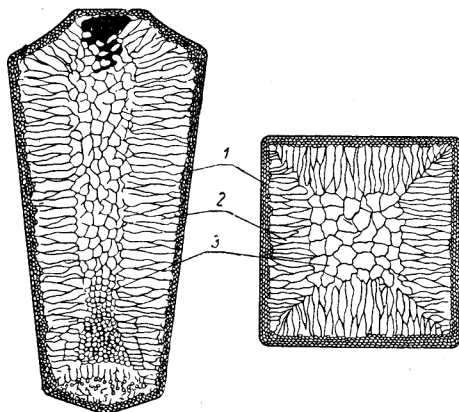


Рис. 1.11. Будова сталевого зливка

- 1 – зовнішня дрібнозерниста зона;
- 2 – зона стовпчастих кристалів;
- 3 – зона рівноосних кристалів

## 1.9 Криві кристалізації. Криві охолодження

Процес кристалізації металу найлегше простежити за допомогою термічного методу, який застосовують для визначення критичних точок.

Критична точка – це температура, при якій у металі відбувається кристалізація. Через те, що поняття «точка» – це поняття графічне, критичні точки можна побачити на графіку, який називається графіком (кривою) кристалізації, або графіком (кривою) охолодження (рис. 1.12).

Для побудови кривої охолодження використовують експериментальні дані. Для цього у тиглі розплавляють метал, вимірюють його температуру через рівні відрізки часу (для цього використовують пірометр та секундомір) і будують графік зміни температури протягом

часу охолодження металу у системі координат «температура – час». З графіку видно, що температура металу знижується нерівномірно; в момент переходу металу з рідкого в твердий стан температура не знижується. Затримка температури пояснюється виділенням прихованої теплоти кристалізації (атоми сповільняють свій рух, стають у вузли просторової кристалічної ґратки і виділяють при цьому велику кількість теплоти).

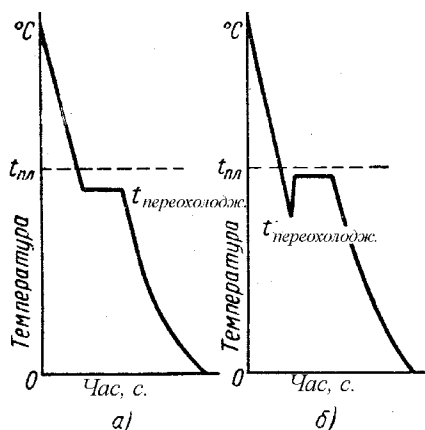


Рис. 1. 12. Криві охолодження

а) кристалічні тіла; б) кристалічні тіла  
з петлею переохолодження

Затримка зниження температури зображена на графіку горизонтальним відрізком лінії. Після закінчення кристалізації температура металу знову починає знижуватись. Час затримки визначається масою охолоджуваного металу.

Досліди показують, що в реальних умовах охолодження розплавленого металу до температури кристалізації кристалізація не починається. Щоб кристалізація почалась, треба знизити температуру від точки  $T_k$  до точки  $T_\phi$  ( $T_\phi$  – фактична температура кристалізації), після чого починається процес кристалізації й температура металу підіймається до температури  $T_k$ . Різниця температур  $T_k$  (теоретичної) і  $T_\phi$  (фактичної) називається *ступенем переохолодження*  $\Delta T$ :

$$n = \Delta T = T_k - T_\phi$$

Чим більша швидкість охолодження, тим більшим буде ступінь переохолодження.

Прикладом процесу кристалізації у природі є замерзання ріки взимку. Хоча надворі мінусова температура, у річці температура води не змінюється (0 °C) до тих пір, аж поки остання крапля рідини не замерзне (закристалізується). На це треба витратити значний час (буває і таке, що не вистачає усієї зими, щоб річка промерзла до дна).

### **Питання для самоконтролю**

1. На які групи поділяють усі метали? Наведіть приклади представників цих груп.
2. Що таке кристалізація та кристалічна ґратка? Якими параметрами характеризують кристалізацію?
3. Які ґратки найпоширеніші серед металів? Чим відрізняється ідеальна ґратка від реальної?
4. Як впливає густина дислокацій на показники міцності?
5. На які властивості впливають точкові дефекти в чистих металах?
6. Що таке границя?
7. Які фактори впливають на розмір зерна закристалізованого металу?
8. Які кристали називають дендритами?
9. Що таке ліквация? Які існують види лікваций?
10. Яку будову має зливочок металу?
11. У яких координатах будується крива охолодження?
12. Що таке ступінь переохолодження?

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВИ ТЕОРІЇ СПЛАВІВ

#### 2.1 Основні поняття та визначення

Основним конструкційним матеріалом, з якого виготовляють ~ 95 % деталей машин, є металеві сплави.

*Сплав* – це матеріал, який отримують переважно сплавленням двох або більшої кількості елементів. Більшість сплавів отримують у рідкому стані сплавленням, проте їх можна створювати також методом спікання, електролізу, конденсації (згущення) із пароподібного стану та ін.

Властивості сплавів значно відрізняються від властивостей чистих металів. Наприклад, залізо має границю міцності близько 250 Мн/м<sup>2</sup> (25 кг/мм<sup>2</sup>), а сплави на його основі – до 2000 Мн/м<sup>2</sup> (200 кг/мм<sup>2</sup>) і вище. Залізо і нікель – метали феромагнітні, а сплав заліза з 25% Ni не має цієї властивості. Сплав, який складається з 50 % Bi, 25 % Pb, 12,5 % Sn і 12,5 % Cd, плавиться при температурі 68 °C (Л68 – сплав Вуда), тоді як найбільш легкоплавкий з його компонентів (Sn) має температуру плавлення 231,9 °C. У машинобудуванні частіше застосовують металеві сплави, ніж чисті метали, оскільки механічні властивості сплавів вищі, а вартість їх, порівняно з чистими металами, нижча.

Елементи, які входять до сплаву, називають *компонентами*. Компонентами можуть бути як метали, так і неметали, як буде показано далі. До компонентів також можна віднести хімічні сполуки. Сплав, який має тільки два компоненти, називається *двокомпонентним*, три – *трикомпонентним* і т. ін. Більшість технічних сплавів є *багатокомпонентними*. Можливість регулювання хімічного складу сплаву в широкому діапазоні з метою зміни властивостей в потрібному напрямку й обумовлює переважне використання металевих сплавів у машинобудуванні.

*Система сплавів* – це вся сукупність сплавів, які можуть бути виготовлені з даних компонентів у різному їх співвідношенні.

*Фаза* – однорідна за складом і будовою частина сплаву, що відокремлена від інших частин поверхнею розділу, при переході через яку властивості змінюються різко (стрибоподібно). Фази можуть

відрізнятися агрегатним станом, хімічним складом, кристалічною структурою.

*Структурна складова* – це частина сплаву, яка виявляється за формою або кольором при дослідженні за допомогою металографічного мікроскопу. Структурна складова може співпадати з фазою, а може складатися з кількох фаз. Структурні та фазові складові сплавів обумовлюють їх властивості.

## **2.2 Фази у сплавах. Поняття про механічні суміші, тверді розчини, хімічні сполуки**

В рідкому стані компоненти сплаву, як правило, повністю розчинюються один у одному та створюють однорідний рідкий розчин. При кристалізації з рідкого стану залежно від фізико-хімічної взаємодії компонентів можуть утворюватися такі тверді фази: чисті компоненти (механічні суміші); тверді розчини; хімічні сполуки.

Структура реальних сплавів може складатися з суміші перелічених компонентів.

*Механічна суміш компонентів* утворюється у тих випадках, коли компоненти у твердому стані не взаємодіють між собою (не розчинюються один в одному і не створюють хімічних сполук).

Розглянемо сплав, який складається з двох компонентів *A* і *B*. В рідкому стані атоми цих компонентів розташовані хаотично. При охолодженні рідкого сплаву нижче температури кристалізації кожний компонент кристалізується окремо з утворенням своєї кристалічної ґратки (рис. 2.1, а). Внаслідок цього в структурі такого сплаву присутні зерна як одного, так і другого чистого компонента, які утворюють механічну суміш (рис. 2.1, б). Прикладами сплавів цієї групи є сплави систем Cu-Pb; Sn-Bi; Zn-Cd; Pb-Sb та інші.

*Твердими розчинами* називають фази, в яких атоми одного компонента певним чином розташовані в кристалічній ґратці другого. Компонент, кристалічна ґратка якого зберігається як основа сплаву, називається *розчинником*. Компонент, атоми якого розташовуються в ґратці основи, називається *розчиненим елементом*. Тверді розчини позначаються грецькими літерами ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). На відміну від механічної суміші, твердий розчин є однофазним, має одну кристалічну ґратку.

Залежно від характеру розміщення атомів розчиненого компонента в ґратці розчинника розрізняють тверді розчини

заміщення і проникнення. На рисунку 2.2 показані схеми кристалічної будови таких твердих розчинів. Існують також тверді розчини віднімання (з дефектною ґраткою), але вони менш поширені.

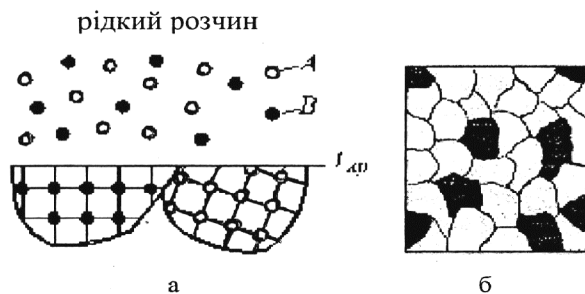


Рис. 2.1. Схеми кристалізації (а) і мікроструктури (б) сплавів, в яких утворюється механічна суміш компонентів: світлі – зерна компонента *A*, чорні – компонента *B*

*Тверді розчини заміщення.* Залежно від кількості компонента, який може розчинитися в ґратці розчинника, тверді розчини поділяються на *необмежені*, або з необмеженою розчинністю та *обмежені* (з обмеженою розчинністю). В обмежених твердих розчинах в ґратці розчинника роже розміститися тільки певна кількість атомів розчиненого компонента. При необмеженій розчинності можлива зміна концентрації розчиненого елемента до 100 %, тобто утворюється неперервний ряд твердих розчинів.

Тверді розчини заміщення утворюють метали з металами. Такі розчини можуть бути обмеженими та необмеженими. Тверді розчини з необмеженою розчинністю утворюються за таких умов: різниця атомних розмірів компонентів не перевищує 8-10 %; компоненти мають однаковий тип кристалічної ґратки і схожу будову електронних оболонок атомів.

Тверді розчини заміщення з необмеженою розчинністю утворюються у системах сплавів Cu-Ni; Ag-Au; Nb-Ti та ін. Тверді розчини заміщення з обмеженою розчинністю утворюються у системах сплавів Al-Si; Al-Cu; Al-Mg; Cu-Zn та ін.

*Тверді розчини проникнення.* В таких твердих розчинах атоми розчиненого елемента розташовуються між вузлами кристалічної



ґратки розчинника. При цьому період ґратки розчинника завжди збільшується.

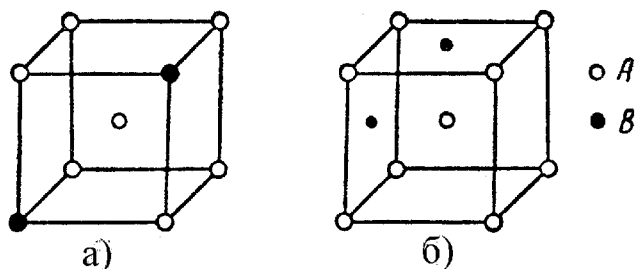


Рис. 2.2. Схема кристалічної будови твердих розчинів:  
а – заміщення; б – проникнення;  
А – атом розчинника; В – атом розчиненого елемента

Тверді розчини проникнення можуть бути тільки обмеженими. Вони утворюються при взаємодії металів з неметалевими елементами (вуглець, водень, азот, бор), які мають невеликі атомні розміри порівняно з металами, завдяки чому їх атоми можуть розміщатися у міжвузлях ґратки. В таких розчинах відношення радіуса атому розчиненої речовини (неметалу) до радіуса розчинника (основного металу) має не перевищувати 0,59. Роль цього типу твердих розчинів дуже значна у залізовуглецевих сплавах. Схеми утворення при кристалізації твердих розчинів показані на рис. 2.3.

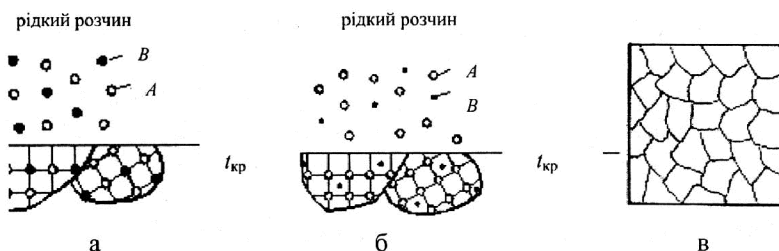


Рис. 2.3. Схеми утворення при кристалізації твердих розчинів заміщення (а) і проникнення (б) та структури твердого розчину (в)

Як видно зі схеми, в твердому розчині заміщення атоми розчиненого компонента  $B$  розташовуються у вузлах ґратки компонента  $A$  (рис. 2.3, а), а в твердому розчині проникнення – у міжвузлях (б).

Структура твердого розчину нагадує структуру чистого компонента (рис. 2.3, в). Таку однофазну структуру мають необмежені тверді розчини. В обмежених твердих розчинах така структура існує тільки до певної кількості розчиненого елемента  $B$ , яка відповідає границі розчинності. При вищому вмісті компонента  $B$  у структурі поряд з твердим розчином будуть присутні інші фази – хімічні сполуки, які утворюють при кристалізації власні зерна (частинки), або інші тверді розчини.

*Хімічна сполука* – це фаза, що утворюється з компонентів, які у певному кількісному співвідношенні вступають у хімічну реакцію, внаслідок якої утворюється нова кристалічна ґратка, що відрізняється від ґраток компонентів (рис. 2. 4). Кількісне співвідношення атомів у хімічній сполуці називають *стехіометричним* (у загальному вигляді  $A_nB_m$ ).

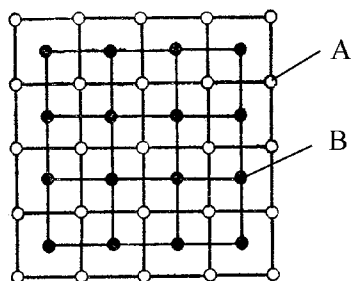


Рис. 2.4. Ґратка сплаву-хімічної сполуки ( $A_nB_m$ )

Як правило, хімічні сполуки утворюються між компонентами, які мають різні типи кристалічних ґраток і сильно відрізняються електронною будовою. Хімічні сполуки, які утворюються між металами, називають *інтерметалідами* ( $Ni_3Al$ ,  $Cu_2Al$ ). Хімічні сполуки металу з вуглецем отримали назву *карбідів* ( $Fe_3C$ ,  $Cr_7C_2$ ), з азотом – *нітридів* ( $Fe_2N$ ,  $TiN$ ), з азотом і вуглецем – *карбонітридів* ( $Fe_3CN$ ,  $TiCN$ ), з бором – *боридів* ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ).

Реальні сплави найчастіше мають складну структуру, яка може бути механічною сумішшю окремих компонентів, двох або декількох твердих розчинів різного типу, твердого розчину та хімічної сполуки тощо. Для систематизації сплавів залежно від характеру взаємодії компонентів, температури та концентрації використовують *діаграми стану*, які дозволяють оцінювати їх фазовий та структурний склад.

## 2.3 Криві кристалізації сплавів. Діаграма рівноважного стану

Для побудови діаграм стану необхідно знати критичні температури сплаву, які визначають на основі аналізу процесів охолодження або нагрівання сплаву за кривими охолодження.

Криві охолодження будують дослідним шляхом у координатах «температура – час». Якщо в охолоджуваному металі не відбувається ніяких фазових перетворень, то крива охолодження буде плавною, без перегинів і уступів, але якщо при охолодженні металу в ньому відбуваються фазові перетворення, які супроводжуються виділенням тепла, то на кривій охолодження з'являться горизонтальні ділянки, або зломи (тобто зміни напрямку кривої). Ці зломи і горизонтальні ділянки (температури, при яких відбуваються перетворення) дають змогу визначити температуру перетворень і називаються *критичними точками*.

Температуру початку кристалізації сплаву називають температурою (точкою) *ліквідус* (від лат. liquidus – рідкий), а закінчення кристалізації – *солідус* (solidus – твердий).

Побудова діаграм стану сплавів базується на експериментальному одержанні серії графіків охолодження або нагрівання з різним співвідношенням компонентів системи та визначення за ними критичних температур фазових перетворень, за якими будують діаграми стану.

*Діаграма рівноважного стану* (або діаграма фазової рівноваги) – це графічне зображення змін фазового складу (або структури) сплавів даної системи в стані рівноваги залежно від концентрації компонентів та температури. Вона являє собою графічне зображення стану сплаву в залежності від умов, при яких він знаходиться. Умови – це фактори, що діють на систему (сплав). Це температура і тиск (зовнішні фактори), та концентрація складових (внутрішній фактор). Через те, що тиск у процесі наших випробувань практично не змінюється, надалі усі сплави будемо розглядати при постійному тиску, тобто вплив зовнішнього фактору – тиску вилучимо.

Тоді діаграма стану являтиме собою графік, де по вісі ординат відкладають температуру, а по вісі абсцис – концентрацію складових сплаву. По діаграмі стану сплаву даних компонентів можна заздалегідь робити висновки про властивості всіх сплавів системи.

Діаграма стану дозволяє визначити структуру сплаву, кількісний та якісний склад структури при будь-якій температурі та концентрації складових.

## 2.4 Методи побудови діаграм стану

Існує багато методів побудови діаграм стану:

- 1) дилатометричний метод (зміна довжини чи об'єму зразка зі сплаву, що досліджують, при нагріванні чи охолодженні);
- 2) електричний метод (зміна електроопору при нагріванні чи охолодженні);
- 3) магнітометричний метод (зміна магнітних властивостей зразка);
- 4) метод гартувань;
- 5) термічний метод.

Суть будь-якого методу зводиться до визначення критичних точок при нагріванні чи охолодженні сплавів. Найбільш простим і тому зручним методом є термічний метод побудови діаграм.

Розглянемо будову діаграми стану сплаву, компоненти якого у твердому стані утворюють *механічні суміші* (системи Pb-Sb, Zn-Cd та ін.). На рисунку 2.5 наведені криві охолодження чистих компонентів *A* і *B* та їх сплавів різної концентрації, а також діаграма стану системи

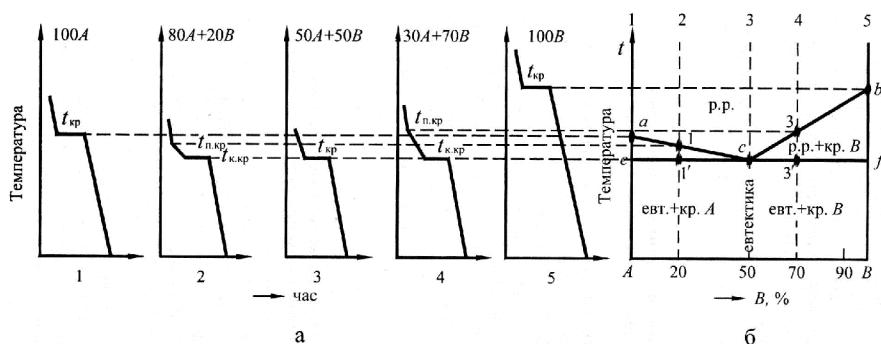


Рис. 2.5. Криві охолодження (а) і діаграма стану (б) системи сплавів, в яких утворюється механічна суміш компонентів: 1 – чистий компонент *A*; 2, 3, 4 – сплави різної концентрації; 5 – чистий компонент *B*

сплавів цих компонентів. У цьому прикладі концентрації вибрані довільно, довільним є і вигляд їх кривих охолодження.

Для побудови діаграми стану переносять температури початку і кінця кристалізації сплавів з кривих охолодження у систему координат температура-концентрація компонентів. Концентрація змінюється від чистого компонента *A* до чистого компонента *B*. Тобто, критичні точки беремо з графіків (кривих охолодження), які будуються досвідним шляхом. Для цього треба взяти кілька сплавів даної системи (чим більше, тим краще) з різною концентрацією складових і простежити за охолодженням кожного сплаву протягом певного часу. Тому криві охолодження й будують у координатах «температура – час».

Маючи кілька кривих охолодження сплавів, на цих кривих у місцях їх перегину знаходимо критичні точки, які переносимо на майбутню діаграму стану, яка будується в координатах «температура – концентрація». З'єднуючи плавними кривими чи прямими лініями критичні точки, які було перенесено на майбутню діаграму стану, одержуємо лінії діаграми *acbef*. Кожна точка на діаграмі стану показує стан сплаву даної концентрації при даній температурі. Лінії на діаграмі розмежовують ділянки фазових станів.

## 2.5 Діаграма стану сплавів, в яких утворюється механічна суміш (І роду)

Такий тип діаграми мають сплави, компоненти яких не розчиняються один в одному у твердому стані і не утворюють хімічні сполуки, а утворюють сплав – механічну суміш (системи Pb - Sb, Zn - Cd та ін.). Розглянемо її на прикладі системи Pb - Sb.

Початок кристалізації різних сплавів системи Pb - Sb починається при різних температурах, а кінець кристалізації – при одній температурі для усіх сплавів системи. Тільки чисті метали (100 % Pb і 100 % Sb) мають по одній критичній точці й тільки евтектичний сплав (13 % Sb) також має одну критичну точку (рис. 2.6).

Вище від лінії *ABC* усі сплави перебувають у рідкому стані. Тому лінія *ABC* називається лінією *ліквідусу*.

Нижче від лінії *DBE* усі сплави перебувають у твердому стані. Тому лінія *DBE* називається лінією *солідусу*.

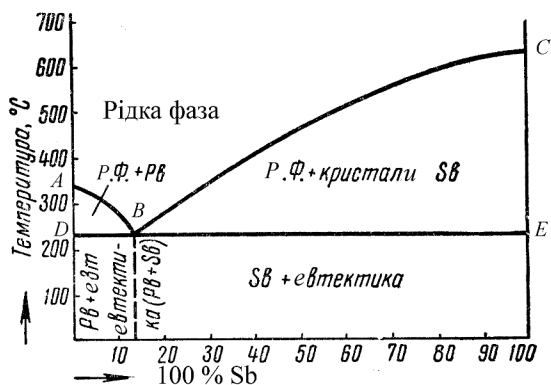


Рис. 2.6. Діаграма стану сплаву  
«свинець – сурма» (I роду)

У точці *B* при вмісті у сплаві 13 % Sb та 87 % Pb і при температурі 246 °C кристалізація свинцю та сурми відбувається одночасно; утворюється тонка механічна суміш кристалів свинцю та сурми (двох фаз). Ця суміш називається *евтектикою* (евтектика (грецька мова) – «легкоплавкий»), а сплав відповідного складу – *евтектичним*. Евтектичний сплав має найнижчу температуру плавлення з усіх сплавів даної системи.

Сплави, які містять менше 13 % Sb, називаються *доевтектичними*, а які містять більше 13 % Sb – *заевтектичними*. Кристалізація доевтектичних сплавів починається з виділення рідкого розчину кристалів свинцю (Pb). Для заевтектичних сплавів кристалізація починається з виділення з рідкого розчину кристалів сурми (Sb).

Склад рідкої фази в процесі кристалізації, змінюючись з пониженням температури по лінії ліквідус (*ABC*) в кінці кристалізації буде відповідати точці *B* (евтектика, що буде складатися з 13 % Sb і 87 % Pb). У рідкої фази цього складу при температурі 246 °C буде відбуватися кристалізація одночасно свинцю та сурми з утворенням евтектики. Тому лінія солідус (*DBE*) і є лінією утворення евтектики. В рівновазі при цьому знаходяться три фази: рідка фаза складу точки *B* (13 % Sb і 87 % Pb) і дві тверді – кристали свинцю та сурми.

### 2.5.1 Правило фаз (закон Гіббса)

Процеси, що відбуваються у металах та сплавах при їх фазових перетвореннях, підпорядковані загальному закону рівноваги, який називається *правилом фаз Гіббса*. Правило фаз виражає кількісну залежність між числом ступенів свободи, числом компонентів і фаз в умовах рівноваги (рис. 2.7).

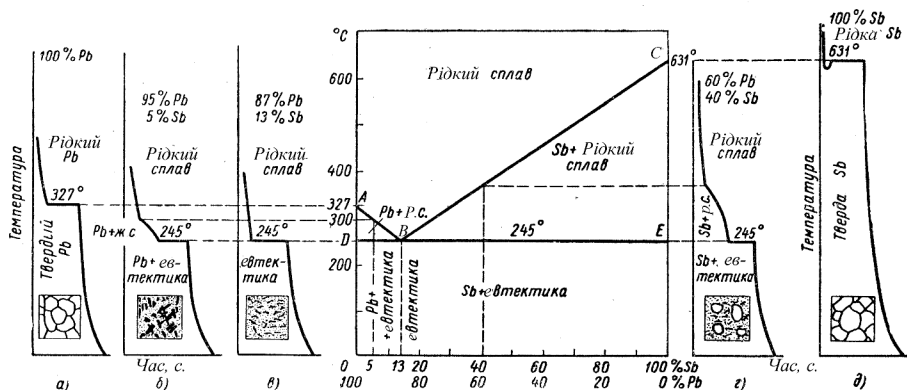


Рис. 2.7. Криві охолодження (а - д) та діаграма стану Pb-Sb

Математично правило фаз виражається рівнянням:

$$C = K - \Phi + n,$$

де  $C$  – число ступенів свободи;

$K$  – число компонентів, утворюючих систему;

$n$  – число зовнішніх факторів (температура й тиск). Якщо перетворення у сплавах відбуваються при постійному тиску, тоді  $n = 1$ ;

$\Phi$  – число фаз, що знаходяться в рівновазі.

Під *числом ступенів свободи* розуміється кількість незалежних змінних (зовнішніх та внутрішніх факторів), зміна яких не призводить до зміни стану рівноваги системи, тобто, до зміни числа фаз, які знаходяться у рівновазі.

До числа незалежних змінних відносяться концентрація кожного компонента у кожній фазі (внутрішній фактор) і зовнішні фактори – температура та тиск.

Якщо  $n = 1$ , то правило фаз Гіббса буде мати вигляд:

$$C = K - \Phi + 1.$$

При  $C = 0$ , система не має жодного ступеню свободи (нонваріантна), тобто фази знаходяться в рівновазі при суворо визначеній температурі й концентрації. В рівновазі при цьому знаходяться три фази: рідка і дві тверді (або три тверді).  $C = 1$  вказує, що система при даних умовах має одну ступінь свободи (система моноваріантна), тобто, коли змінити зовнішній фактор (температуру), услід за цим зміниться концентрація рідкої та твердої фаз, але рівновага не порушиться. У рівновазі будуть знаходитися дві фази: тверда і рідка, або дві тверді.  $C = 2$  вказує, що система при даних умовах має два ступеня свободи, тобто існує область, у якій можна змінити температуру і концентрацію сплаву, не порушуючи рівноваги. У рівновазі при цьому знаходиться одна фаза.

### 2.5.2 Правило відрізків (важеля)

У процесі кристалізації змінюється як концентрація фаз (наприклад, з рідини випадають кристали одного з компонентів), так і кількість кожної фази (при кристалізації кількість рідкої фази зменшується, а твердої – збільшується).

У будь-якій точці діаграми (рис. 2.8), коли у сплаві існує дві фази, можна визначити кількість обох фаз та їх концентрацію.

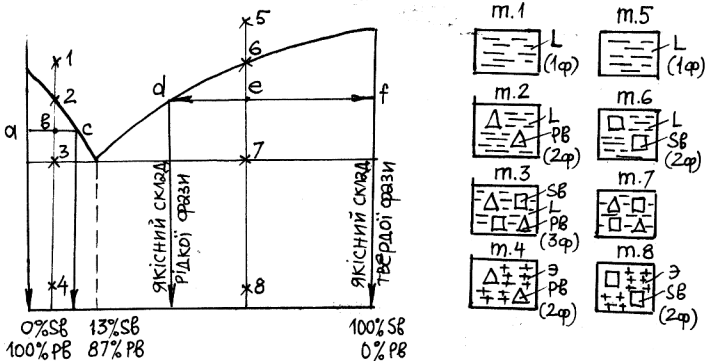


Рис. 2.8. Кількісний і якісний склад фаз



Правило відрізків можна використовувати й для визначення складу і кількості фаз або структурних складових у твердому стані для діаграм стану, компоненти яких утворюють евтектику або евтектоїд.

Правило відрізків дозволяє вирішити дві задачі: визначити кількісний склад фаз; якісний склад фаз.

Щоб визначити *кількісний склад фаз*, присутніх у сплаві при визначених умовах, необхідно через точку, яка відображає стан сплаву у даний момент, провести горизонтальну лінію (*коноду*) до перетину з найближчими лініями діаграми. Кількість шуканої фази дорівнює відношенню віддаленого від цієї фази відрізка до усього відрізка (*коноди*).

$$Q_{\text{фаза}} = \frac{a\tilde{n}}{a\tilde{n}}; \quad Q_{\text{фаза}} = \frac{a\tilde{a}}{a\tilde{n}}$$

Щоб визначити *якісний склад фаз*, треба вийти на межу твердої чи рідкої фази з даної точки. Проекції точок перетину горизонтальної лінії з найближчими лініями діаграми на вісь концентрації виражають якісний склад фаз.

На рисунку 2.8 проекція точки *a* на вісь концентрацій визначить якісний склад твердої фази. Проекція точки *c* визначить якісний склад рідкої фази.

## 2.6 Діаграма стану сплавів, у яких утворюється необмежений твердий розчин (II роду)

Такий тип діаграми мають сплави, компоненти яких необмежено розчинюються один в одному не тільки в рідкому, а й у твердому стані, утворюючи тверді розчини заміщення. Це системи Cu-Ni, Fe-Ni, Mo-W, Ag-Au та ін. Розглянемо її на прикладі діаграми стану сплавів мідь – нікель (рис. 2.9).

Сплави різних концентрацій твердіють у визначеному інтервалі температур та мають на кривих охолодження дві критичні точки (два регіони).

У проміжку між ними, тобто між початком "*a*" та кінцем "*b*" твердіння, з рідкого сплаву випадають кристали твердого розчину.

Верхня лінія діаграми *ACB* відповідає початку кристалізації та має назву *ліквідус*, вище неї сплави знаходяться у рідкому стані. Нижня лінія *ADB* – кінець кристалізації та називається *солідус*, нижче

неї всі сплави знаходяться у твердому стані. Таким чином, вище лінії  $ACB$  сплави нікелю з міддю складаються з однорідного рідкого сплаву, нижче лінії  $ADB$  – з одного твердого розчину. Сплави – тверді розчини – однофазні.

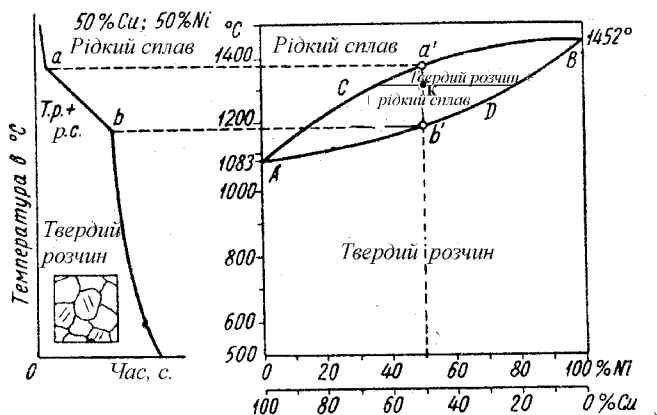


Рис. 2.9. Діаграма стану сплавів мідь – нікель

Застосовуючи правило фаз до діаграми цього типу, одержуємо вище лінії  $ACB$  та нижче лінії  $ADB$  одну фазу при двох компонентах ( $C = 3 - 1 = 2$ ), інакше кажучи, система двохваріантна. Усередині площини  $ACBDA$  присутні дві фази. Тут  $C = 3 - 2 = 1$ , тобто система одноваріантна.

Згідно з правилом відрізків, кількість фаз у точці  $K$  визначається проведенням горизонтальної лінії через цю точку до перетину з лініями ліквідус та солідус. Ці точки перетину вкажуть концентрацію рідкої фази та твердого розчину. Відносні вагові кількості (тобто твердої фази та рідкої фази) за правилом важеля визначаються за співвідношенням аналогічно попередньо розглянутій діаграмі першого роду (Pb-Sb).

## 2.7 Діаграма стану сплавів, в яких утворюються обмежені тверді розчини

Діаграми цього типу мають сплави, компоненти яких у рідкому стані розчиняються необмежено, а у твердому – обмежено.

Такі діаграми мають найважливіші та найпоширеніші промислові сплави систем Al-Cu, Cu-Zn, Ti-Al та ін. Оскільки принцип побудови діаграм за кривими охолодження (нагрівання) був розглянутий вище, наведемо цей тип діаграми без кривих охолодження (рисунок 2.10). Прикладом такої діаграми може бути діаграма мідь – срібло (Cu - Ag).

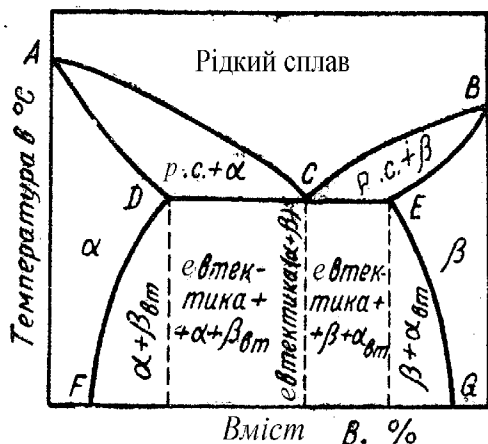


Рис. 2.10. Діаграма стану системи сплавів, у яких утворюються обмежені тверді розчини

З точки  $c$ ) та  $\beta$  (справа від  $c$ ). Обидва тверді розчини є обмеженими, тобто можуть вмістити в свою ґратку тільки певну кількість атомів другого компоненту.

З діаграми видно, що максимальна розчинність компонента  $B$  в  $A$  (максимальна концентрація твердого розчину  $\alpha$ ), характеризується проекцією точки  $D$  на вісь концентрацій. Максимальна розчинність  $A$  в компоненті  $B$  (максимальна концентрація твердого розчину  $\beta$ ) – проекцією точки  $E$  на вісь концентрацій.

В інтервалі концентрацій від  $D$  до  $E$  формується механічна суміш не з чистих компонентів, а твердих розчинів, і утворюється евтектика, яка складається з суміші кристалів  $\alpha$ - та  $\beta$ -твердих розчинів. Точка  $c$  – евтектична точка, лінія  $DCE$  – евтектична горизонталь. Лінії  $DF$  та  $EQ$  називаються лініями обмеженої розчинності.

Тут лінією ліквідусу є лінія  $ACB$ , лінією солідусу –  $ADCEB$ . Лінії  $ac$  і  $bc$  при охолодженні відповідають початку кристалізації обмежених твердих розчинів  $\alpha$  (твердий розчин компонента  $B$  у компоненті  $A$ ) і  $\beta$  (твердий розчин компонента  $A$  у компоненті  $B$ ). Між лініями ліквідусу і солідусу у сплавах присутні рідкий розчин та тверді розчини  $\alpha$  (зліва від

При зниженні температури внаслідок зменшення розчинності починається виділення з твердих розчинів надлишкової кількості розчиненого елемента ( $\alpha_{em}$ ,  $\beta_{em}$ ), у зв'язку з чим у структурі сплавів з концентрацією в інтервалі  $FQ$  з'являються додаткові фази. Виділення надлишкових фаз через зміну розчинності відбувається в твердому стані, тобто відбувається вторинна кристалізація.

## 2.8 Діаграма стану сплавів, в яких утворюються стійкі хімічні сполуки

Хімічна сполука, як уже відзначалося, характеризується певним кількісним (stechiometric) співвідношенням компонентів, яке відтворюється формулою  $A_nB_m$ . Якщо хімічна сполука стійка, тобто не розкладається при нагріванні, її можна розглядати як компонент сплаву (системи). Прикладом такої діаграми може бути діаграма Mg - Ca (рис. 2.11).

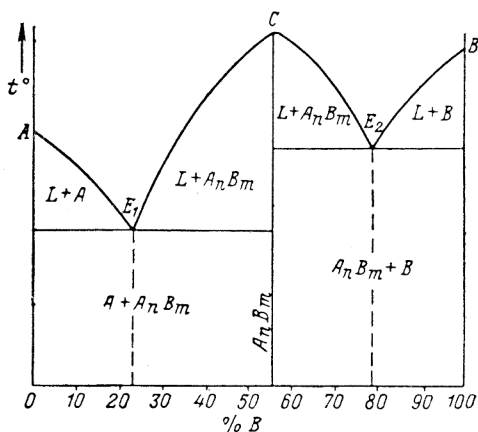


Рис. 2.11. Діаграма магній – кальцій (Mg – Ca)

Хімічну сполуку  $A_nB_m$  можна розглядати, як третій компонент, який ділить діаграму на дві діаграми, кожна з яких подібна до діаграми I роду. Тут хімічний сполуці відповідає вертикальна лінія, що проходить через точку  $c$  та характеризує її стехіометричний склад. В сплавах, залежно від концентрації, формуються два види евтектики (точки  $E_1$  та  $E_2$ ). В реальних сплавах діаграми з хімічною сполукою можуть бути складнішими.

До сплавів, в яких утворюються хімічні сполуки, належать залізовуглецеві сплави, діаграми стану яких розглядатиметься далі.

## 2.9 Взаємозв'язок між властивостями сплавів та їх діаграмами стану (закон Курнакова – Жемчужного)

Властивості сплаву значною мірою зумовлені структурою, яка в свою чергу залежить від хімічного складу і характеру взаємодії компонентів, що впливає на тип діаграми стану. Тому зрозуміло, що між видом діаграми стану і властивостями сплаву існує певний зв'язок. Закономірності зміни фізико-механічних властивостей сплаву залежно від концентрації компонентів та їх зв'язок з типом діаграми були встановлені в роботах провідних вчених (Курнаков, Жемчужний, Бочвар). Ці закономірності наведені на рис. 2.12, де зіставлені тип діаграми (верхня частина рисунку) та зміна властивостей (нижня частина рисунку).

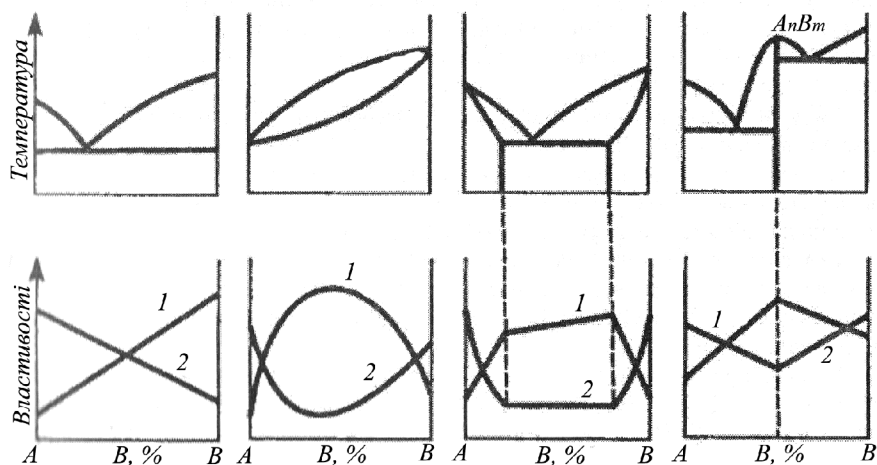


Рис. 2.12. Діаграми стану та властивостей сплавів (за М. Курнаковим):  
1 – твердість; 2 – електропровідність

Діаграми «склад – властивості» мають велике практичне значення при створенні нових сплавів, що повинні мати задані властивості.

Крім твердості, міцності, електропровідності діаграми стану дають можливість визначити ливарні властивості, здатність піддаватися гарячій механічній обробці, обробці різанням та ін.

Величина перепаду температур між точками ліквідусу і солідусу визначає ступінь ліквідації та можливої неоднорідності сплаву. Евтектичні сплави мають кращі ливарні властивості (найбільш низьку температуру плавлення з усіх сплавів системи, високу рідкотекучість, незначну ліквідацію) та оброблюваність різанням. Такі сплави широко використовуються як ливарні для виготовлення припоїв (системи Sn-Zn, Sn-Pb, Pb-Ag, Ag-Cu). Сплави – тверді розчини добре обробляються тиском (легко піддаються волочінню, куванню, пресуванню).

Таким чином, закономірності Курнакова, Жемчужного, Бочвара можна з успіхом використовувати для вибору сплавів з потрібними експлуатаційними і технологічними властивостями.

Було розглянуто чотири основні типи діаграм стану двокомпонентних сплавів. Слід зазначити, що для промислових сплавів діаграми бувають значно складнішими, бо промислові сплави, як правило, багатокомпонентні. Для описання їх фазового та структурного складу використовують просторові діаграми стану. В інженерній практиці для аналізу таких сплавів часто обмежуються розгляданням двокомпонентних діаграм двох основних компонентів сплаву.

### **Питання для самоконтролю**

1. Дайте визначення поняттям: сплав, компонент, система сплавів, фаза, структурна складова.
2. Що таке механічна суміш? За яких умов вона утворюється? Наведіть приклади сплавів, що утворюють механічну суміш.
3. Що таке твердий розчин? Які типи твердих розчинів існують?
4. На які види поділяються тверді розчини залежно від кількості компонента, що може розчинитися в ґратці розчинника?

5. Яку структуру мають необмежені та обмежені тверді розчини?

6. Що таке хімічна сполука? Дайте визначення поняттю стехіометричний склад. Наведіть приклади хімічних сполук різного типу.

7. Що таке діаграма стану? Наведіть методи побудови діаграм стану сплавів.

8. Що таке критичні точки? Як експериментально їх можна визначити?

9. Які процеси відбуваються при температурах, яким відповідають лінії ліквідусу та солідусу?

10. Що таке евтектика, евтектична точка, евтектична горизонталь?

11. Як за діаграмою стану можна визначити співвідношення рідкої та твердої фаз між лініями ліквідусу та солідусу?

12. Опишіть хід кристалізації необмеженого твердого розчину. Наведіть приклад сплавів, в яких утворюються необмежені тверді розчини.

13. З яких фаз складається евтектика, яка формується в сплавах з утворенням хімічної сполуки?

14. Який зв'язок існує між типом діаграми стану та властивостями сплавів?

## РОЗДІЛ 3

### ДІАГРАМА «ЗАЛІЗО – ВУГЛЕЦЬ»

#### 3.1 Властивості чистого заліза. Алотропія

Залізо – це метал, в якому відбувається поліморфне перетворення. Найбільш стійкою кристалічною ґраткою є така, що володіє найменшим запасом вільної енергії. Але при зміні температури чи тиску ґратка може перебудовуватися.

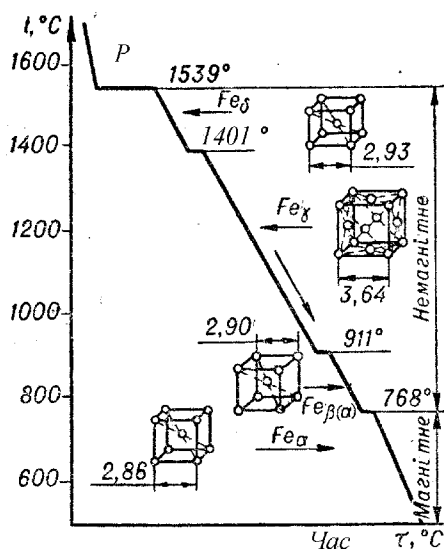


Рис. 3.1. Крива охолодження чистого заліза

Існування одного металу (речовини) у кількох кристалічних формах називається *поліморфізмом* або *алотропією*. Різні кристалічні форми одної речовини називаються поліморфними або алотропічними модифікаціями (різнovidами).

Алотропічні форми позначаються грецькими літерами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  та ін., які у вигляді індексів додають до символу, що позначає елемент (наприклад,  $\text{Fe}_\alpha$ ,  $\text{Fe}_\beta$ ,  $\text{Fe}_\gamma$ , рис. 3.1). Найнижчій температурі відповідає літера  $\alpha$ , потім  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  та ін.

Перетворення однієї алотропічної форми в іншу при нагріванні супроводжується поглинанням тепла і відбувається при постійній тем-

пературі. На кривій кристалізації (що будується в координатах «температура – час») це перетворення відзначається горизонтальною ділянкою. При охолодженні відбувається виділення тепла.

Цікавий приклад. Олово існує у двох модифікаціях  $\alpha$  і  $\beta$ . Нижче + 18 °C стійким є так зване сіре олово ( $\alpha$ ). При охолодженні  $\alpha$  – олово з'являється у вигляді окремих горбів на  $\beta$  – олові (так звана «олов'яна чума»). Сіре олово – це сірий порошок, який не володіє



металічними властивостями (не знаючи цього, загинула експедиція Скотта до Південного полюсу, що зберігала гас у бідонах, паяних оловом).

*Залізо* – метал з питомою вагою  $7,8 \text{ г/см}^3$ , температурою плавлення  $1539^\circ\text{C}$ , твердістю 80 НВ. У чистому вигляді в природі практично не зустрічається, легко вступає у реакцію, утворюючи хімічну сполуку. З багатьма елементами залізо утворює розчини: з металами – розчини заміщення, з вуглецем, азотом та воднем – розчини проникнення.

Залізо існує у двох алотропічних формах ( $\alpha$  і  $\gamma$ ). Існування цих форм спостерігається зі зміною визначеної температури, що пояснюється зміною запасу внутрішньої енергії при зміні температури.

### 3.2 Фази у сплавах системи залізо-вуглець

Залізо двічі змінює свою ґратку – при  $911^\circ\text{C}$  і при  $1392$  ( $1401^\circ\text{C}$ ) – за останніми даними температура  $1392^\circ\text{C}$  уточнена завдяки новим методам дослідження діаграм і становить  $1401^\circ\text{C}$ . Нижче  $911^\circ\text{C}$  залізо має об'ємноцентровану кубічну ґратку (ОЦК), називається  *$\alpha$ -залізо* і позначається  $Fe_\alpha$ . При нагріванні до температури  $911^\circ\text{C}$  ґратка заліза змінюється на гранецентровану кубічну (ГЦК). Це  *$\gamma$ -залізо* ( $Fe_\gamma$ ). При  $1392$  ( $1401^\circ\text{C}$ ) відбувається ще одне поліморфне перетворення – ГЦК ґратка знову перетворюється на ОЦК. Високотемпературне залізо з ОЦК-ґраткою називають  *$\delta$ -залізом* ( $Fe_\delta$ ). Під час охолодження відбуваються зворотні перетворення ґраток. Площинки на кривій охолодження відповідають критичним точкам (температурі кристалізації заліза та температурам поліморфних перетворень); поруч з кривою схематично показані кристалічні ґратки.

У залізі також відбувається магнітне перетворення, тобто перехід при нагріванні з феромагнітного до парамагнітного стану (при охолодженні – навпаки). Воно здійснюється при  $768^\circ\text{C}$  (*точка Кюрі*) та не супроводжується зміною типу ґратки. Відповідно сучасним уявленням, при магнітному перетворенні відбувається зміна не у кристалічній структурі, а у взаємодії зовнішніх і внутрішніх електронних оболонок атомів.

*Вуглець* – неметалічний елемент з питомою вагою  $2,5 \text{ г/см}^3$ , атомним радіусом  $0,77\text{\AA}$ , з температурою плавлення  $3500^\circ\text{C}$ . Вуглець

має три алотропічні форми: алмаз, графіт та вугілля. Вуглець у залізовуглецевих сплавах може кристалізуватися у вільному стані у вигляді графіту (температура плавлення 2862 °С) або взаємодіяти з залізом, утворюючи тверді розчини і хімічну сполуку. Графіт має гексагональну шарувату ґратку, неміцний, непластичний, зустрічається у сірих чавунах.

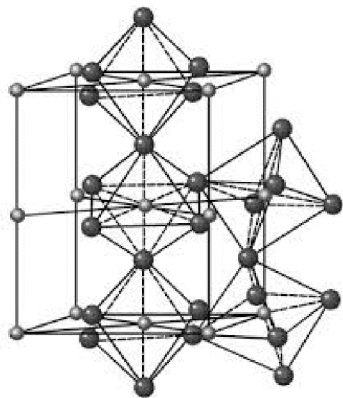


Рис. 3.2. Кристалічна орторомбічна ґратка цементиту

Залізо з вуглецем утворює ряд хімічних сполук  $\text{FeC}$ ,  $\text{Fe}_2\text{C}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{FeC}_2$ ,  $\text{FeC}_3$  та ін. Найбільш стійким з цих карбідів є цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) – карбід заліза.

*Цементит* – дуже тверда речовина ( $> 800 \text{ HB}$ ), але дуже крихка. Він містить 6,67 % С, має складну орторомбічну кристалічну ґратку з дванадцятьма атомами заліза і чотирма вуглецю (рис. 3.2), температуру плавлення близько 1250 °С, має магнітні властивості нижче температури 217 °С. У залізовуглецевих сплавах цементит, як фаза, може виділятися при різних умовах: цементит первинний – виділяється з рідини у вигляді великих

пластинчастих кристалів; цементит вторинний – виділяється з твердої фази і після евтектоїдного перетворення стає зернами перліту; цементит третинний виділяється з фериту з концентрацією вуглецю до 0,022% у вигляді дрібних включень і розташовується біля границь феритних зерен.

*Ферит* ( $\Phi$ ) – обмежений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі ( $\text{Fe}_\alpha$ ). Ферит має кубічну об'ємноцентровану ґратку.

*Аустеніт* ( $A$ ) – обмежений твердий розчин вуглецю в  $\gamma$  – залізі. Аустеніт має кубічну гранецентровану ґратку. Його назвали на честь відомого англійського вченого Р. Аустена (R.Austen).

Ферит – м'яка фаза ( $\text{HB} \sim 70$ ,  $\sigma_{\text{в}} \sim 200\text{-}250 \text{ МПа}$ ) з високою пластичністю ( $\delta \sim 40 \%$ ,  $\psi \sim 70 \%$ ). Аустеніт має дещо вищу твердість і міцність ( $170\text{-}200 \text{ HB}$ ,  $\sigma_{\text{в}} \sim 500\text{-}800 \text{ МПа}$ ), зберігаючи при цьому високу пластичність ( $\delta \sim 50 \%$ ,  $\psi \sim 60 \%$ ).

### 3.3 Діаграма стану залізо-цементит ( $Fe - Fe_3C$ )

Вивчення діаграми залізо-вуглець започатковано російським вченим Д.К. Черновим і опубліковано в роботі «Критический обзор статей Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные исследования Д.К. Чернова по этому же предмету» (1868 р.). У цій роботі автор вперше встановив існування в сталях критичних точок в залежності від вмісту вуглецю і графічно представив у вигляді діаграми.

Із розвитком технічних засобів і наукових розробок положення критичних точок уточнювалися. Великий внесок було зроблено Осмондом, Ле-Шательє, Р. Аустеном, А.А. Байковим та іншими вченими, які за допомогою металографічних методів уточнювали положення критичних точок і вміст вуглецю в різних структурних складових.

Діаграма стану  $Fe - Fe_3C$  охоплює тільки невелику частину всієї системи сплавів залізо-вуглець і обмежується кількістю вуглецю 6,67 %, що відповідає цементиту. Саме ці сплави знайшли широке практичне застосування.

Наявність невеликої кількості звичайних домішок у сталях не впливає істотно на положення критичних точок і характер ліній діаграм, тому сталь можна з відомим наближенням розглядати як подвійний сплав «залізо – вуглець» ( $Fe - C$ ).

На рисунку 3.3 зображена діаграма стану сплавів залізо - цементит. Вона будується у координатах температура - процентний вміст вуглецю. Ліва вертикаль (з температурною шкалою) відповідає чистому залізу, а права – цементиту. На цьому ж рисунку позначені структури областей діаграми. Кожна похила лінія діаграми є геометричним місцем критичних точок сплавів, у яких відбувається начало та кінець якоїсь зміни в сплаві. На горизонтальних лініях діаграми відбувається і початок, і кінець якогось перетворення.

Найбільша кількість вуглецю, за діаграмою (6,67 %) відповідає вмісту вуглецю в хімічній сполуці – цементиті.

Отже, компонентами, з яких складаються сплави цієї системи, будуть, з одного боку, чисте залізо  $Fe$ , з другого – цементит  $Fe_3C$ .

У залежності від умов (температури та концентрації компонентів) можуть утворюватися:

- 1) *тверді розчини* (аустеніт і ферит);

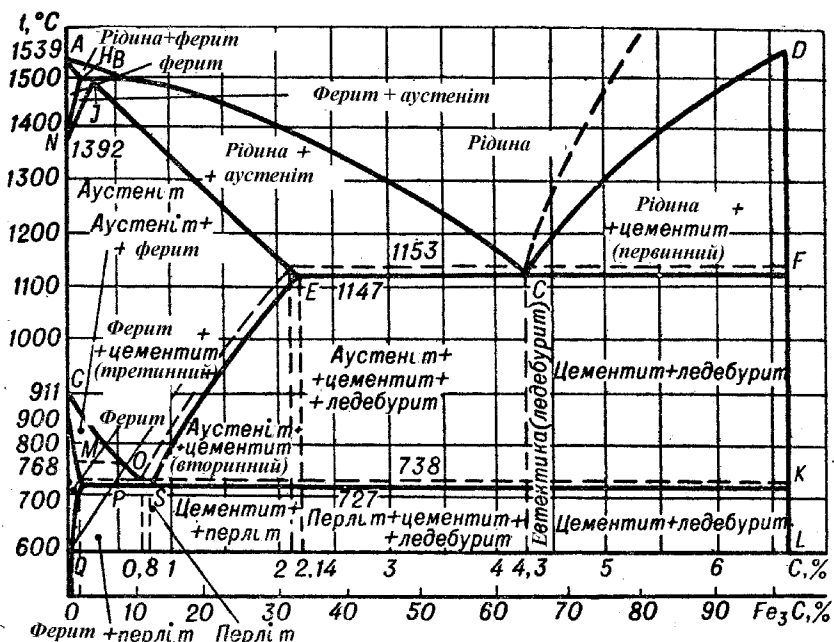


Рис. 3.3. Діаграма стану «залізо – вуглець» ( $Fe - Fe_3C$ ) та ( $Fe - C$ ) – пунктирні лінії

- 2) механічні суміші (перліт та ледебурит);
- 3) хімічні сполуки (цементит).

Відповідно є дві діаграми сплавів «залізо – вуглець»: цементитна ( $Fe - Fe_3C$ ) і графітна ( $Fe - C$ ).

Графіт – це фаза, що складається виключно з вуглецю із шаруватою гексагональною решіткою. Густина графіту ( $2,3 \text{ г/см}^3$ ) менша за густину решти фаз і це сповільнює його утворення, що призводить до виділення цементиту при швидкому охолодженні. Утворення графіту зменшує усадку при кристалізації, графіт виконує роль мастила при терті, зменшуючи знос, сприяє розсіюванню енергії вібрацій.

Як видно з діаграми, структура аустеніту складається з однієї фази – твердого розчину. Максимальна розчинність вуглецю у  $\gamma$  – залізі дорівнює 2,14 % при температурі 1147 °C (точка E), мінімальна розчинність дорівнює 0,8 % при температурі 727 °C (точка S).

Структура фериту складається також з однієї фази – твердого розчину. Максимальна розчинність вуглецю у  $\alpha$  – залізі дорівнює 0,02 % при 727 °С (точка *P*), мінімальна розчинність дорівнює 0,006 % при температурі 0 °С (точка *Q*).

*Ледебурит (L)* – евтектика (яка отримала назву на честь німецького вченого-металурга А. Ледебура) – механічна суміш аустеніту і цементиту первинного у межах температур від 1147 °С до 727 °С (дві тверді фази). Нижче температури 727 °С аустеніт ледебуриту перетворюється у перліт, який складається з двох твердих фаз (фериту і цементиту). Ледебурит утворюється із рідкої фази визначеного складу, що містить 4,3 % вуглецю. Точка *C* – *евтектична точка*, лінія *ECF* – *евтектична горизонталь*.

*Перліт (P)* – евтектоїд (тобто подібний до евтектики; від слова *перл*, оскільки на протравленому шліфі він має характерний блиск, що нагадує перламутр) – механічна суміш фериту і цементиту із вмістом 0,8 % вуглецю. Структура перліту складається з двох твердих фаз: фериту та цементиту вторинного, цей процес відбувається при постійній температурі (727 °С), точка *S* є *евтектоїдною точкою*, лінія *PSK* – *евтектоїдною горизонталлю*.

Різниця між евтектикою та евтектоїдом полягає в тому, що евтектика формується з рідкого розчину, а евтектоїд – з твердого.

Лінія *ABCD* – лінія *ліквідус* (або лінія первинної кристалізації), лінія *AHJECF* – лінія *солідус*.

Проаналізуємо діаграму без врахування поліморфного  $\gamma \leftrightarrow \delta$ -перетворення, яке відбувається при високих температурах (лівий верхній кут діаграми) і практично не впливає на структуру та властивості більшості залізовуглецевих сплавів.

По лінії *ACD* йде перетворення рідкого стану в твердий.

1. На лінії *AC* з рідкого сплаву виділяється перший кристал аустеніту.
2. На лінії *CD* з рідкого сплаву виділяється кристал цементиту первинного.
3. На лінії *AE* остання крапля рідкого сплаву переходить в аустеніт (закінчується кристалізація).
4. На лінії *GS* з аустеніту виділяється перший кристал фериту.
5. На лінії *SE* з аустеніту випадає перший кристал цементиту вторинного.
6. На лінії *GP* останній кристал аустеніту переходить у ферит.

7. По лінії *ECF* при температурі 1147 °С відбувається одночасно кристалізація аустеніту і цементиту та утворюється евтектика (ледебурит). Лінія *ECF* називається лінією первинної кристалізації, або евтектичного перетворення (або ледебуритного).

8. Лінія *PSK* – лінія вторинної кристалізації, або евтектоїдного перетворення (перлітного). По лінії *PSK* аустеніт при охолодженні перетворюється у перліт.

9. На лінії *PQ* з фериту виділяється перший кристал цементиту третинного.

Структурні складові залізовуглецевих сплавів показані на рисунку 3.4.

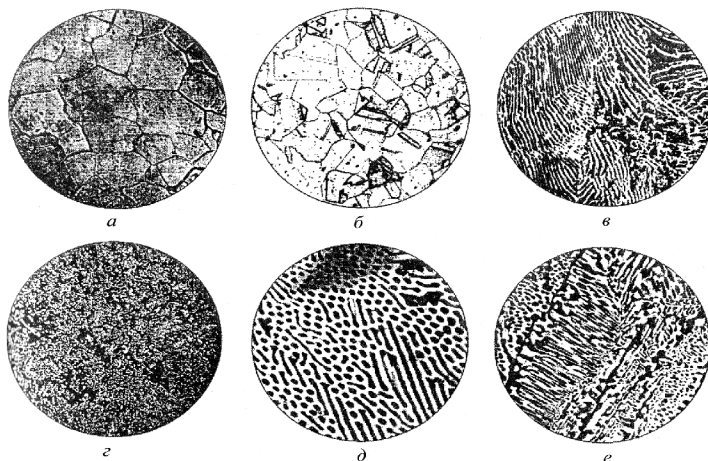


Рис. 3.4. Мікроструктури залізовуглецевих сплавів:

*a* – ферит,  $\times 200$ ; *б* – аустеніт,  $\times 100$ ;

*в* – перліт пластинчастий,  $\times 200$ ;

*г* – перліт зернистий,  $\times 200$ ; *д*, *е* – ледебурит,  $\times 350$

Умовно діаграму поділяють на дві частини: до 2,14 % С – називають сталеву частину, а від 2,14 % С до 6,67 % С – чавунною.

За вмістом вуглецю сплави сталеві та чавунні частин діаграми поділяють на три види: сталеві – доєвтектоїдні (до 0,8 % С), евтектоїдні (0,8 % С) та заєвтектоїдні (від 0,8 % до 2,14 % С); чавунна – доєвтектичні (від 2,14% С до 4,3 % С), евтектичні (4,3 % С) та заєвтектичні (від 4,3 % С до 6,67 % С).

### 3.4 Аналіз сплавів

Для засвоєння методики проведення аналізу сплавів візьмемо для прикладу в сталевій частині діаграми доєвтектоїдний сплав із вмістом вуглецю 0,5% - I (рис. 3.5). При температурі точки 1 сплав буде знаходитися в рідкому стані. Зі зниження температури на лінії AC (в точці 2), в рідкому стані з'явиться перший кристал аустеніту. В інтервалі температур від точки 2 до точки 3 будуть продовжуватися виділятися кристали аустеніту. В точці 3 кристалізація завершиться. До лінії GS (точка 4) сплав буде складатися з аустеніту, структурних перетворень тут не буде. В точці 4 з аустеніту буде виділятися перший кристал фериту. Ферит буде виділятися зі зниження температури до лінії PS (точка 5).

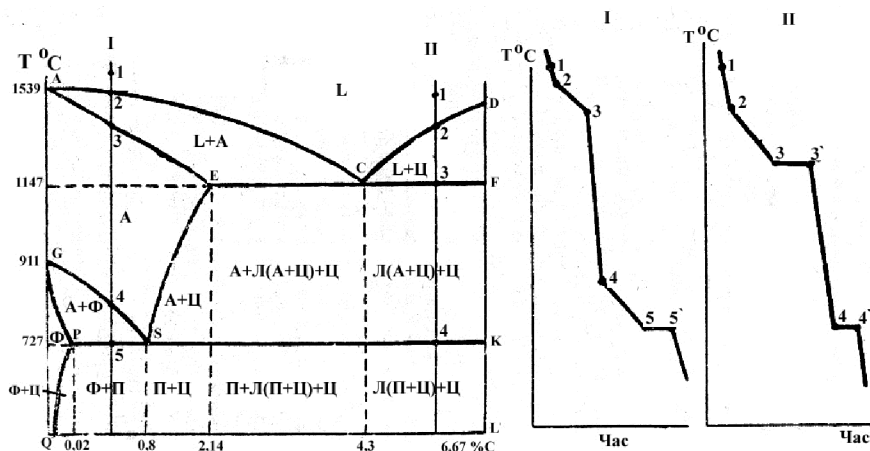


Рис. 3.5. Аналіз сплавів діаграми залізо-цементит

На лінії PS аустеніт, що залишився, перейде у перліт, а ферит змін не набуває. Коли цей перехід повністю завершиться, сплав продовжує своє охолодження до кімнатної температури, маючи структуру ферит + перліт.

Аналогічним чином проаналізуємо один зі сплавів чавунної частини діаграми (наприклад, заєвтектичний сплав, який має 3 % вуглецю - II).

При температурах від точки 1 до лінії  $CD$  (точка 2), сплав знаходиться у рідкому стані. В точці 2 з'явиться перший кристал цементиту первинного. Цементит буде продовжувати виділятися до лінії  $CF$ .

На лінії  $CF$  (точка 3) рідкий сплав, що залишився перейде в ледебурит (тобто з рідкого сплаву, що залишився, відбувається одночасне випадіння кристалів аустеніту та цементиту).

Від точки 3 до лінії  $SK$  твердий сплав, який має структуру ледебуриту та цементиту, буде охолоджуватись з деяким збільшенням проценту цементиту, який виділяється з аустеніту (по лінії  $CF$ ). В точці 4 аустеніт, який входить до складу ледебуриту, перейде у перліт, а цементит змін не набуває. Таким чином, сплав, що аналізуємо, при кімнатній температурі буде мати в структурі ледебурит (составу перліт + цементит) та цементит.

### 3.5 Правило фаз

Правило фаз ( $C = K - \Phi + 1$ ) дозволяє без експериментальних досліджень уявити форму кривої охолодження сплаву будь-якої концентрації. Для того, щоб це зробити, необхідно попередньо навчитись визначати фази в будь-якій точці діаграми стану.

Фазами на діаграмі є: аустеніт, ферит, цементит, рідкий сплав.

Перліт та ледебурит являють собою *структури* та самі складаються з двох фаз: перліт (ферит + цементит); ледебурит (вище  $727^{\circ}\text{C}$ ) складається з аустеніту та цементиту, а нижче  $727^{\circ}\text{C}$  – з фериту та цементиту (так як перліт, який входить в ледебурит, складається з фериту та цементиту).

При визначенні фаз в будь-якій двофазній області діаграми слід керуватися таким правилом: фазовий склад будь-якої двофазної області діаграми визначається прилягаючими до неї по горизонталі однофазними областями. Виходячи з цього, діаграму стану можна зобразити з вказівкою фаз в усіх областях.

Фази на лініях діаграми визначаються фазами зон, які розділяються цими лініями. Так, наприклад, на лінії  $GS$  буде дві фази ( $A + \Phi$ ), так як в прилягаючих зонах існують фази  $A + \Phi$  та  $A$ .

На лінії  $SK$  будуть три фази ( $A + \text{Ц} + \Phi$ ), так як вище її буде  $A + \text{Ц}$ , а нижче –  $\Phi + \text{Ц}$ . Для побудови кривої охолодження заданого сплаву (наприклад, сплаву з 0,5 % C) визначимо за правилом фаз



число ступенів свободи в кожній точці. Компонентів завжди буде два – залізо та цементит.

$$C_1 = 2 - 1 + 1 = 2 \quad (\Phi = 1; \text{рідкий сплав } L);$$

$$C_2 = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (\Phi = 2; L \text{ та перший кристал } A);$$

$$C_3 = 2 - 1 + 1 = 2 \quad (\Phi = 1; A);$$

$$C_4 = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (\Phi = 2; A \text{ перший кристал } \Phi);$$

$$C_5 = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (\Phi = 3; A; \Phi \text{ та } \text{Ц});$$

$C_5'' = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (\Phi = 2; \text{так як } A \text{ перейде в } \text{Ц} \text{ та залишиться дві фази} - \Phi \text{ та } \text{Ц}).$

Примітка. Число ступенів свободи рівне двом показує, що в точці, яку розглядають, може змінюватись як концентрація, так і температура сплаву (в визначених межах) без порушення числа фаз у системі (без порушення рівноваги). Один ступінь свободи означає, що можлива або зміна концентрації сплаву, або зміна його температури, і рівновага фаз від цього не порушується.

При нульовому ступені свободи, щоб не порушити рівноваги присутніх в сплаві фаз, не можна змінити ні концентрації сплаву, ні його температури.

Фази на лініях діаграми визначаються фазами зон, які розділяються цими лініями. Так, наприклад, на лінії  $GS$  буде дві фази ( $A + \Phi$ ), тому що в прилягаючих зонах існують  $A + \Phi$  та  $A$ . На лінії  $SK$  буде три фази ( $A + \text{Ц} + \Phi$ ), тому що вище неї буде  $A + \text{Ц}$ , а нижче –  $\Phi + \text{Ц}$ .

Коли розглядають якийсь конкретний сплав, то тим самим вже вносять обмеження за його концентрацією, тому, коли на якійсь лінії діаграми буде число ступенів рівне 1 або 2, то це означає, що можливо подальше охолодження сплаву і на кривій охолодження у цій критичній точці буде злам – змінюється темп охолодження.

Нульовий ступінь свободи вказує, що на кривій охолодження буде температурна зупинка. Крива охолодження розглянутого сплаву, який має 0,5 % C, показана на рисунку 3.4 (крива I).

Аналогічно проаналізуємо сплав II, який має 5 % C:

$$\text{Точка 1: } C_1 = 2 - 1 + 1 = 2 \quad (\Phi = 1; L);$$

$$\text{Точка 2: } C_2 = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (\Phi = 2; \text{перший кристал } \text{Ц} \text{ та } L);$$

$$\text{Точка 3: } C_3 = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (\Phi = 3; L + \text{Ц} + A);$$

$$\text{Точка 4: } C_4 = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (\Phi = 3; A + \text{Ц} + \Phi);$$

$$C_{4-1} = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (\Phi = 2; \Phi + \text{Ц}).$$

Крива охолодження цього сплаву (II) показана на рисунку 3.5.

### 3.6 Правило відрізків

Правило відрізків дозволяє визначити кількість фаз, присутніх в сплаві заданої концентрації при будь-якій температурі.

Для цього необхідно з заданої точки (наприклад, точка "а", рис. 3.6) в обидва боки провести горизонтальні відрізки "ав" та "ас" до перетинання з ближніми лініями діаграми.

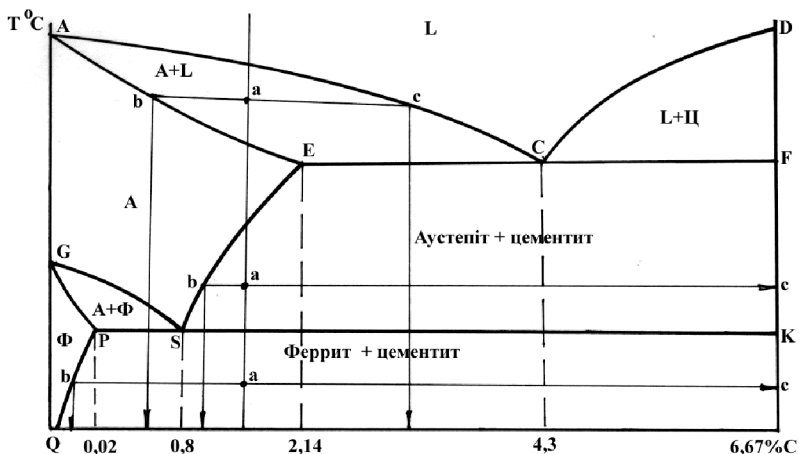


Рис. 3.6. Визначення кількісного та якісного складу фаз за правилом відрізків

Сумарний відрізок "bc", який називають конодою, приймається за 100% сплав. Кінцеві точки коноди вказують присутні в сплаві фази, а її відрізки – співвідношення цих фаз. При цьому кількість фази, яка вказується лівим кінцем коноди, визначається відношенням правого відрізка до всієї коноди.

Для даного випадку математично процентний вміст фаз в сплаві в точці "а" може бути виражений наступним чином:

$$\% A = \frac{ac}{bc} \cdot 100\%; \quad \% L = \frac{ab}{bc} \cdot 100\%.$$

Аналогічним чином може бути визначено кількість фаз в другій області (наприклад, в області SEFK). В точці "а" буде дві фази – аустеніт та цементит.

Відрізок "ва", який прилягає до зони чистого аустеніту, буде визначати кількість цементиту, а відрізок, який прилягає до зони цементиту – кількість аустеніту:

$$\%A = \frac{\hat{a}\hat{n}}{\hat{a}\hat{n}} \cdot 100\%; \quad \% \ddot{O} = \frac{\hat{a}\hat{a}}{\hat{a}\hat{n}} \cdot 100\%.$$

Однак правило фаз, крім кількісного співвідношення фаз, дозволяє визначити процентний вміст компонентів, присутніх в кожній фазі сплаву в точці, яка розглядається. Процентний вміст складових у фазі визначається по осі абсцис шляхом проведення з точки, яку розглядають, горизонтальної лінії (коноди) до перетинання з межею однофазної зони даної фази та опускання перпендикуляру на вісь концентрації (вісь абсцис).

Залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю менше 2,14 % називаються *сталями*, більше 2,14 % – *чавунами*.

Діаграма стану сплавів залізо-цементит дозволяє визначити будову вуглецевих сталей та чавунів, структуру і фазовий склад для кожного сплаву при різних кількості вуглецю та різних температурах. Це допомагає вирішувати практичні задачі, які стосуються вибору температурних режимів обробки тиском, термічної обробки заготовок та виробів.

### Питання для самоконтролю

1. Що таке поліморфізм, поліморфне перетворення? Які поліморфні перетворення відбуваються в залізі?
2. Що таке «точка Кюрі» та який температурі вона відповідає?
3. При якій температурі існує  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ -залізо?
4. Які перетворення відбуваються по основним лініям діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C?
5. Назвіть лінії ліквідусу та солідусу для сплавів системи Fe - Fe<sub>3</sub>C.
6. Чим відрізняється евтектика від евтектоїда?
7. Що таке ферит, аустеніт, цементит, ледебурит та перліт?
8. Які лінії на діаграмі Fe - Fe<sub>3</sub>C відповідають евтектичній та евтектоїдній горизонталям?
9. Назвіть лінії обмеженої розчинності вуглецю в аустеніті та фериті.

10. Яка максимальна розчинність вуглецю у фериті та аустеніті?

11. На які види за вмістом вуглецю поділяють сталі та чавуни?

12. За допомогою чого можна без експериментальних досліджень уявити форму кривої охолодження сплаву будь-якої концентрації?

13. Що таке сталі?

14. Що таке чавуни?

## РОЗДІЛ 4

### ВУГЛЕЦЕВІ СТАЛІ

#### 4.1 Вплив вуглецю та постійних домішок на властивості сталей

Сталь – це багатокомпонентна система, в якій крім заліза і вуглецю завжди присутні постійні, або технологічні (обумовлені особливостями виробництва) домішки: кремній, марганець, сірка і фосфор, газу та ін.

*Вуглець* є найважливішим елементом, який обумовлює структуру і властивості сталі, її поведінку при виготовленні, обробці та експлуатації деталей. З підвищенням концентрації вуглецю зменшується кількість м'якого фериту та зростає частка твердого та крихкого цементиту. Завдяки цьому твердість та міцність зростають, відносно подовження та відносно звуження, ударна в'язкість зменшуються (рис. 4.1).

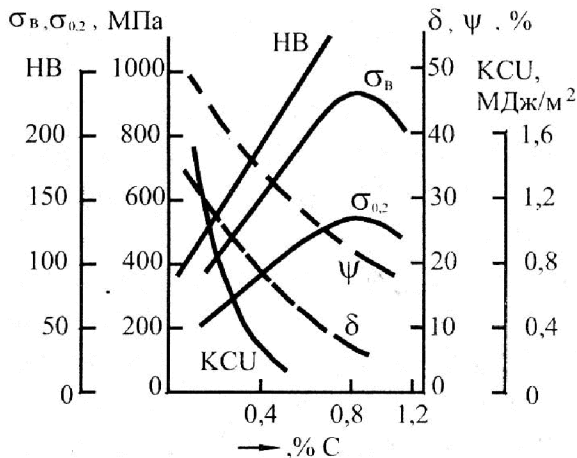


Рис. 4.1. Вплив вуглецю на механічні властивості сталей

Як видно з рисунка, при концентрації вуглецю більше 0,9 % показники міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ ) починають знижуватися. Це викликано

тим, що в заєвтектоїдних сталях вторинний цементит виділяється у вигляді сітки по границях зерен, що полегшує руйнування.

Вуглець також знижує в'язкість руйнування сталі і підвищує поріг холодноламкості. Збільшення вмісту вуглецю змінює й технологічні властивості: погіршується здатність до штампування, зварюваність, оброблюваність різанням, але покращуються ливарні властивості.

Доевтектоїдні сталі в основному використовують для виготовлення деталей машин і конструкцій, заєвтектоїдні – для інструменту.

*Сірка і фосфор* – це шкідливі домішки, які потрапляють у сталь з вихідної сировини (металобрухту, чавуну).

*Сірка* не розчиняється в залізі, як інші домішки, а утворює з ним хімічну сполуку  $FeS$  (сульфід заліза), яке входить до складу легкоплавкої евтектики з температурою плавлення  $988^{\circ}C$ . При твердінні сталі ця евтектика розміщується у вигляді легкоплавких оболонок на границях зерен. Наявність таких оболонок є причиною *червоноламкості* (крихкості при високих температурах) з підвищеним вмістом сірки при гарячій обробці (куванні, штампуванні, прокатуванні та ін.). Оболонки розплавляються, в результаті чого між зернами втрачається зв'язок і утворюються тріщини. Крім того, сірка знижує пластичність і міцність сталі, опір стиранню та корозійну стійкість.

*Фосфор* надає сталі *холодноламкості* (крихкості при звичайній і зниженій температурі). Це пояснюється тим, що фосфор розчиняється у фериті й аустеніті та сильно спотворює кристалічну ґратку. Кожен 0,01 % фосфору підвищує поріг холодноламкості сталі на  $20-25^{\circ}C$ . При цьому значно знижується пластичність і в'язкість, тобто сталь стає крихкою. Максимальний допустимий вміст фосфору в сталі 0,045 %. Концентрація сірки і фосфору в сталі є головними показниками, які регламентують якість сталі. У зв'язку з цим вміст сірки та фосфору в сталі обмежують.

*Марганець і кремній* – це домішки, які додають у сталь для її розкислення у процесі виплавлення. Марганець і кремній є корисними домішками, вони зміцнюють сталь, хоча у зазначених межах істотного впливу на властивості сталі не виявляють.

Вуглецева сталь містить 0,5-0,8 % марганцю. Марганець у такій кількості повністю розчиняється у фериті, що дещо підвищує

міцність і пружність і практично не знижує пластичність. Марганець також нейтралізує шкідливий вплив сірки, утворюючи з нею сполуку  $MnS$ , яка плавиться при температурі 1600 °С. Внаслідок цього границі зерен не оплаваються при гарячій пластичній деформації.

Концентрація кремнію у сталі залежить від ступеня її розкислення: в киплячій сталі  $Si \sim 0,01-0,03 \%$ ; в напівспокійній –  $0,03-0,17 \%$ ; у спокійній –  $0,17-0,37 \%$ . Кремній значно підвищує границю текучості і пружності сталі, знижуючи пластичність. Тому сталі з мінімальним вмістом кремнію (як правило, киплячі) зазвичай використовують для виготовлення кузовів автомобілів і тракторів або деталей глибокого штампування та складної витяжки.

*Гази* (азот, кисень, водень) присутні в сталі в незначній кількості.

Залежно від способу виробництва вміст кисню, азоту та водню в сталі може бути в межах від 0,0001 до 0,1 % (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Вміст газів у сталі при різних способах виробництва

У відсотках

Газ	Спосіб виробництва сталі			
	Електро-сталь	Мартенів-ський	Киснево-конвер-торний	Бесеме-рівський
Водень	0,0002-0,0006	0,0002-0,0006	0,0001-0,0003	0,0004-0,0007
Азот	0,008-0,010	0,004-0,006	0,001-0,003	0,010-0,014
Кисень	0,01-0,02	0,02-0,04	0,02-0,04	0,04-0,10

Азот і кисень утворюють в сталях неметалеві включення (нітриди, оксиди), які зменшують ударну в'язкість та різко збільшують поріг холодноламкості. Водень не утворює з'єднань із залізом, тому він може виділятися з металу. Однак, якщо водню забагато в сталі, то це може призвести до вкрай небезпечних внутрішніх надривів в металі, які називаються *флокенами*.

## 4.2 Структури відпалених вуглецевих сталей

Відповідно діаграмі стану залізо – цементит, усі вуглецеві сталі у відпаленому стані при кімнатній температурі мають п'ять видів структур. Структури відпалених вуглецевих сталей та їх схематичне зображення показані на рис. 4.2.

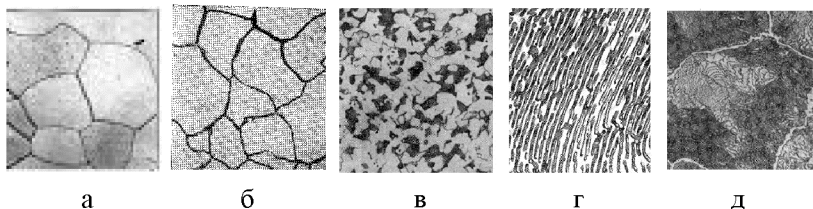


Рис. 4.2. Структури вуглецевих сталей:  
а – ферит; б – ферит і цементит третинний; в – ферит і перліт;  
г – перліт; д – перліт і цементит вторинний

При концентрації вуглецю від 0 до 0,006 % сталь має структуру фериту (рис. 4.2, а). Світлі зерна – це ферит. Сталі з концентрацією вуглецю від 0,006 % до 0,02 % мають структуру фериту + цементиту третинного (рис. 4.2, б); від 0,02 % до 0,8 % – структуру фериту + перліту (рис. 4.2, в). Перліт має вигляд темних зерен. Він складається з пластинок цементиту, розташованих у феритній матриці на певній відстані одна від іншої. Його пластинчаста структура виявляється при великому збільшенні. Всі ці сталі носять назву доєвтектоїдних.

Евтектоїдна сталь містить в собі рівно 0,8 % вуглецю і має структуру перліту (рис. 4.2, г). Заєвтектоїдна сталь містить в собі від 0,8 % до 2,14 % вуглецю і має структуру перліту і цементиту вторинного, розташованого у вигляді тонкої білої сітки навколо зерен перліту (рис. 4.2, д).

Структури сталей можна зобразити схематично (рис. 4.3).

Евтектоїдна сталь містить в собі рівно 0,8 % вуглецю і має структуру перліту. Заєвтектоїдна сталь містить в собі від 0,8 % до 2,14 % вуглецю і має структуру перліту і цементиту вторинного, розташованого у вигляді тонкої білої сітки навколо зерен перліту.



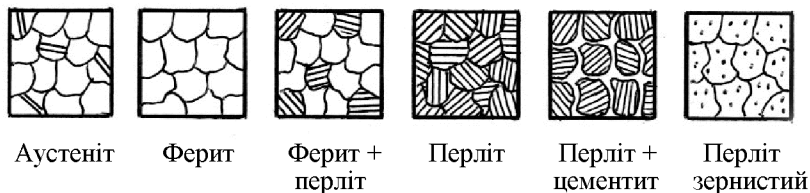


Рис. 4.3. Схематичне зображення структур відпаленої сталі

### 4.3 Класифікація, маркування та застосування вуглецевих сталей

На вуглецеві сталі припадає  $\sim 85$  % від загального обсягу виробництва сталі. Ці сталі дешеві, поєднують задовільні механічні властивості ( $\sigma_v$  до 1000 МПа при достатній пластичності та ударній в'язкості) з добрими технологічними показниками (легко оброблюються різанням та тиском).

Вуглецеві сталі класифікують за наступними ознаками:

1) *за вмістом вуглецю*: низьковуглецеві (менше 0,3 %C), середньо-вуглецеві (0,3-0,5 %C); високовуглецеві (більше 0,6 %C);

2) *за ступенем розкислення*: спокійна (розкислена марганцем, кремнієм та алюмінієм), напівспокійна (розкислена марганцем та кремнієм), кипляча (розкислена тільки марганцем);

3) *за способом виробництва*: мартенівська, киснево-конвертерна, електросталь;

3) *за якістю*: звичайної якості ( $S \leq 0,06$  %,  $P \leq 0,045$  %), якісні ( $S \leq 0,035$  %,  $P \leq 0,03$  %), високоякісні ( $S \leq 0,025$  %,  $P \leq 0,025$  %);

4) *за структурою у відпаленому стані*: доевтектоїдні, евтектоїдні, заевтектоїдні;

5) *за призначенням*: конструкційні (для деталей машин і елементів конструкцій), інструментальні (для інструменту), автоматні та котельні.

За методом придання форми та розмірів сталі можуть бути:

литі – стальне фасонне литво (після цифр у марці ставиться літера Л, наприклад, 15Л - 55Л);

ковані – поковки кування та штампування;

прокатані – прокат різного профілю (стрічка, дріт, прутки, лист і т. ін.);

Конструкційні сталі поділяються на будівельні та машинобудівельні. Конструкційні будівельні – це, як правило, сталі звичайної якості. Конструкційні машинобудівельні – як правило, якісні та високоякісні сталі.

#### 4.4 Вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості

Властивості вуглецевої сталі залежать від вмісту вуглецю, дисперсності, форми та розташування структурних складових. Крім того, наявність і кількість домішок має суттєве значення. Наприклад, вміст сірки та фосфору визначає якість вуглецевої сталі.

Сталі звичайної якості поставляють згідно з ДСТУ 2651-2005 (ГОСТ 380-2005), вони найдешевші, в них допускається підвищена концентрація шкідливих домішок ( $S \leq 0,06 \%$ ,  $P \leq 0,045 \%$ ). Вуглецеву сталь звичайної якості виготовляють наступних марок: Ст.0, Ст.1кп, Ст.1пс, Ст.1сп, Ст.2кп, Ст.2пс, Ст.2сп, Ст.3кп, Ст.3пс, Ст.3сп, Ст.3Гпс, Ст.3Гсп, Ст.4кп, Ст.4пс, Ст.4сп, Ст.5пс, Ст.5сп, Ст.5Гпс, Ст.6пс, Ст.6сп.

Сталі звичайної якості маркують літерами «Ст.» (сталь) і цифрами 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 (умовний номер марки сталі в залежності від хімічного складу). Наприкінці марки позначають ступінь розкислення сталі, наприклад: Ст.1кп; Ст.2пс; Ст.3сп. У деяких марках сталі стоїть літера «Г», яка вказує на кількість марганцю при його масовій частці в сталі 0,80 % і вище (Ст.3Гсп).

Чим більший номер марки, тим вища концентрація вуглецю в сталі та її міцність, а пластичність нижча. Але слід мати на увазі, що номер марки не співпадає з кількістю вуглецю в сталі.

Звичайно хімічний склад сталі (основні елементи) за аналізом проби у ковші повинен відповідати нормам, які вказані в таблиці 4.2.

Граничні відхилення по хімічному складу готового прокату, зливків, заготовок, поковок та виробів подальшого перероблення повинні відповідати нормам, вказаним у таблиці 4.3.

Таблиця 4.2. Хімічний склад сталі за аналізом проби у ковші

У відсотках

Марка сталі	Масова частка хімічних елементів		
	вуглецю	марганцю	кремнію
Ст.0	не більше 0,23	-	-
Ст.1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	не більше 0,05
Ст.1пс	0,06-0,12	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст.1сп	0,06-0,12	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст.2кп	0,09-0,15	0,25-0,50	не більше 0,05
Ст.2пс	0,09-0,15	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст.2сп	0,09-0,15	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст.3кп	0,14-0,22	0,30-0,60	не більше 0,05
Ст.3пс	0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,15
Ст.3сп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30
Ст.3Гпс	0,14-0,22	0,80-1,10	не більше 0,15
Ст.3Гсп	0,14-0,20	0,80-1,10	0,15-0,30
Ст.4кп	0,18-0,27	0,40-0,70	не більше 0,05
Ст.4пс	0,18-0,27	0,40-0,70	0,05-0,15
Ст.4сп	0,18-0,27	0,40-0,70	0,15-0,30
Ст.5пс	0,28-0,37	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст.5сп	0,28-0,37	0,50-0,80	0,15-0,30
Ст.5Гпс	0,22-0,30	0,80-1,20	не більше 0,15
Ст.6пс	0,38-0,49	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст.6сп	0,38-0,49	0,50-0,80	0,15-0,30

Зі сталей звичайної якості виготовляють гарячекатаний прокат (прутки, швелери, балки, листи, труби), а також поковки. Ці сталі широко застосовують для виготовлення будівельних зварюваних, клепанних і болтових конструкцій (сталі Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4). Зі сталей Ст.5, Ст.6 виготовляють малонавантажені й менш відповідальні деталі машин (осі, втулки, шайби, болти, гайки).

Таблиця 4.3. Граничні відхилення по хімічному складу вуглецевих сталей звичайної якості

У відсотках

Найменування елемента	Граничне відхилення по хімічному складу	
	кипляча сталь	напівспокійна та спокійна сталь
Вуглець	+ 0,03	+ 0,03 – 0,02
Марганець	+ 0,05 – 0,04	+ 0,05 – 0,03
Кремній	–	+ 0,03 – 0,02
Фосфор	+ 0,006	+ 0,005
Сірка	+ 0,006	+ 0,005
Азот	+ 0,002	+ 0,002

Киплячі сталі через підвищену кількість кисню і неметалевих включень мають високий опір холодноламкості, погано зварюються. Але в цих сталях, як вже відзначалося, низький вміст кремнію, завдяки чому вони дуже пластичні. Їх використовують для деталей, які виготовляють холодним штампуванням. Для більш відповідальних конструкцій і деталей застосовують спокійні сталі.

#### 4.5 Вуглецеві конструкційні якісні сталі

Вуглецеву якісну сталь виплавляють у кисневих конвертерах, мартенівських та електричних печах.

Вуглецеві якісні сталі поставляють згідно з ДСТУ 7809-2015 (Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. Взамін ГОСТ 1050-88).

Цей стандарт встановлює загальні технічні умови для гарячекатаного та кованого сортового прокату з вуглецевої якісної конструкційної сталі марок 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55ПП) і 60 завтовшки або діаметром до 250 мм, а також для

каліброваного прокату та зі спеціальним обробленням поверхні всіх марок.

Норми хімічного складу, наведені в цьому стандарті, поширюються й на інші види прокату, зливки, поковки, штамповки, заготовки катані та безперервнолиті, що виготовляють зі сталі марок, наведених вище, а також зі сталі марок 05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп, 20пс.

Ці сталі містять менше шкідливих домішок ( $S \leq 0,035 \%$ ,  $P \leq 0,03 \%$ ) і неметалевих включень, ніж сталі звичайної якості. До них ставлять більш жорсткі вимоги відносно складу шихти, умов виплавлення та розливання, однорідності макро- та мікроструктури. Якісні сталі маркують двома цифрами, що вказують середню кількість вуглецю у сотих частках відсотка: сталь 05, 08, 10, 15, 20, 25, 30 і далі через 0,05 %.

Сталі марок 05, 08, 10 мають низьку міцність і високу пластичність. Їх без термічної обробки використовують для малонавантажених деталей і зварних з'єднань. Після відпалу вони добре штампуються у холодному стані. Використовуються для виготовлення каністр, діжок, цистерн, дроту, стрічок та ін. З тонколистових холоднокатаних сталей 08кп і 08Ю (алюміній додають для зменшення вмісту кисню) методом холодного штампування з глибокою витяжкою виробляють кузови легкових автомобілів, кабіни тракторів і вантажних автомобілів.

Низьковуглецеві сталі марок 15, 20, 25 використовують для відповідальних зварних з'єднань, а також деталей машин, зміцнення яких здійснюють за рахунок цементації чи нітроцементації. З них виготовляють шестерні, пальці, вали, осі, кулачки та ін.

Середньовуглецеві сталі марок 30, 35, 40, 45, 50, 55 після термічної обробки мають високий комплекс властивостей – достатньо високі міцність, пластичність та в'язкість. Вони малочутливі до концентраторів напружень, тому їх використовують, головним чином, для деталей, працездатність яких зумовлюється опором втомі, а саме шатунів, різних валів (карданних, колінчастих, розподільних, валів водяної помпи, коробки передач та ін.), маховиків, шестерень, зірочок, осей тощо.

Сталь 58 (55ПП) характеризується зниженим прогартовуванням (ПП). Вона загартовується на глибину 1...2 мм, а серцевина залишається в'язкою. Її використовують замість цементованих сталей.

Високовуглецеві сталі (60, 65 та ін.) поставляють за ГОСТ 14959-2016.Metalloпродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия (взамін 14959-79). Цей стандарт розповсюджується на металопродукцію гаряче-катану та ковану діаметром або товщиною до 270 мм включно, а також калібровану та зі спеціальним оздобленням поверхні, призначену для виготовлення пружин, ресор та інших деталей машин та механізмів, які застосовуються в загартованому та відпущеному стані. Ці сталі після певної термічної обробки мають високу міцність і значну пружність. Тому їх використовують також для торсійних валів, тросів, робочих органів ґрунтообробних машин (борони, плуги, лапи культиваторів, лопати, сапки тощо). Такі сталі належать до групи *ресоро-пружинних*.

#### 4.6 Автоматні сталі

*Автоматні сталі, або сталі підвищеної оброблюваності різанням (ГОСТ 1414-75).* Використовують у масовому виробництві кріпильних виробів (болти, гвинти, гайки і т. ін.) та деяких невідповідальних деталей на верстатах-автоматах з великою швидкістю різання.

Хімічний склад автоматних сталей передбачає отримання короткої ламкої стружки та дозволяє виконувати обробку з великою швидкістю і отримувати високу якість (меншу шорсткість) оброблюваної поверхні.

*Сталі з підвищеним вмістом сірки та фосфору.* Як говорилося, сірка і фосфор окричують сталь, через що стружка стає ламкою, а м'які сульфідні зменшують коефіцієнт тертя. В автоматних сталях цієї групи вміст сірки може сягати 0,3 %, фосфору – 0,15 %.

Сталі маркують літерою А (автоматні) і цифрами, що вказують на середню кількість вуглецю у сотих частках відсотка: сталь А12, А20, А 30, А40Г. Літера Г позначає підвищений вміст марганцю (до 1,2 %), який додається для зменшення червоноламкості. До недоліків цих сталей належить значна крихкість, низька пластичність і в'язкість, підвищена схильність до корозії, знижена границя витривалості. Такі сталі використовують для невідповідальних малонавантажених виробів.

*Сталі зі свинцем.* У сталях цієї групи для покращення оброблюваності різанням додають свинець у кількості 0,15-0,3 %. Свинець під час різання плавиться, що окричує стружку, зменшує зусилля різання та коефіцієнт тертя, та в кінцевому підсумку дає можливість збільшити швидкість різання майже вдвічі.

Маркування: АС14, АС40 – С – свинець, число показує вміст вуглецю – 0,14 і 0,40 % відповідно. Ці сталі менш крихкі, ніж сталі з високим вмістом *S* та *P*. До них іноді додають інші елементи, які полегшують оброблюваність різанням, наприклад, телур.

*Сталі з селеном* містять 0,04 – 0,1 Se, який позначається літерою *E* в кінці марки сталі (А45Е). Селен сприяє кращому відокремленню стружки, що сприяє зниженню витрати різального інструменту та на третину скоротити час обробки. Недоліком цих сталей є їх висока вартість, тому частіше за все селен для покращення оброблюваності різанням додають у леговані сталі.

*Сталі з кальцієм.* Кількість кальцію в цих сталях невелика – 0,003 %, але через утворення крихких неметалевих включень стійкість інструменту збільшується у 1,5 – 3 рази при значному підвищенні швидкості обробки різанням. Кальцієві сталі дешеві, їх маркують АЦ20, АЦ60 (Ц – кальцій, число – вміст вуглецю у сотих частках відсотка).

Останнім часом використовують також комплексні добавки, які складаються з сірки та селену, свинцю та кальцію тощо, з метою покращення оброблюваності різанням. Однак, використовувати всі ці домішки для деталей, які працюють в умовах складного напруженого стану і значних концентраціях напружень неможливо, оскільки ці домішки значно знижують конструкційну міцність.

#### 4.7 Вуглецеві інструментальні сталі

Вуглецеві інструментальні сталі (ГОСТ 1435-99) виплавляють у мартенівських та електричних печах. Інструментальну сталь поділяють на якісну і високоякісну.

Сталь інструментальну якісну позначають літерою *У* і цифрою, або цифрами, що вказують на вміст вуглецю в десятих частках відсотка (наприклад, У7, У8, У9, У10, У11, У12). Якісні сталі містять не більше 0,028 % сірки і 0,30 % фосфору. Сталь інструментальна високоякісна містить менше домішок, ніж якісна

(вміст сірки – не більше 0,018 % і фосфору – до 0,025 %). При її маркуванні додають букву А в кінці марки (наприклад, У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А). Марки та хімічний склад сталей за аналізом після плавки повинні відповідати табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Марки та хімічний склад сталей за плавочним аналізом

Марка сталі	Масова частка елементу, %				
	вуглець	кремній	марганець	сірка	фосфор
У7	0,65-0,74	0,17-0,33	0,17-0,33	0,028	0,030
У8	0,75-0,84	0,17-0,33	0,17-0,33	0,028	0,030
У8Г	0,80-0,90	0,17-0,33	0,33-0,58	0,028	0,030
У9	0,85-0,94	0,17-0,33	0,17-0,33	0,028	0,030
У10	0,95-1,09	0,17-0,33	0,17-0,33	0,028	0,030
У12	1,10-1,29	0,17-0,33	0,17-0,33	0,028	0,030
У7А	0,65-0,74	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025
У8А	0,75-0,84	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025
У8ГА	0,80-0,90	0,17-0,33	0,33-0,58	0,018	0,025
У9А	0,85-0,94	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025
У10А	0,95-1,09	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025
У12А	1,10-1,29	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025

Примітка: літери в позначенні марки сталей означають: У – вуглецева, Г – підвищена масова частка марганцю. Масова частка сірки в сталі, отриманої методом електрошлакового переплаву, не повинна перевищувати 0,013 %.

Вуглецеві інструментальні сталі не можна використовувати для інструменту, який працює з великою швидкістю різання або оброблює тверді матеріали, оскільки твердість цих сталей різко знижується при нагріванні інструменту до 200 °С. З цих сталей виготовляють, насамперед, столярний та слюсарний інструмент. У7, У8 – для молотків, зубил, кернів, викруток тощо. У9 - У12 застосовують для свердел, мітчиків, ножівок. Із сталі У13 виготовляють напилки, калібри, шабери, граверний інструмент.



#### 4.8. Котельні сталі

Котельні сталі – це сталі для котлів, посудин високого тиску. Парових котлів, камер згоряння, газових турбін, судових топок та ін., які повинні працювати при високому тиску та температурі від -40 до 450°C та добре зварюватись. Для забезпечення таких властивостей до їх складу додають титан, а також додатково розкислюють алюмінієм. Вуглецеві котельні сталі маркують цифрою, яка вказує на вміст вуглецю в сотих частках відсотка і додають літеру К.

Наприклад: сталь 12К, 15К, 16К, 18К, 20К, 22К (містять від 0,08 % вуглецю; 0,17- 0,40 % кремнію; 0,35-1,0 % марганцю; < 0,04 % сірки та фосфору). Постачають такі сталі у вигляді листа товщиною до 200 мм.

#### Питання для самоконтролю

1. Що являє собою сталь?
2. Які постійні домішки присутні в сталях та як вони туди потрапляють?
3. Як впливають постійні домішки на властивості сталі?
4. Що таке червоноламкість та яким чином її можливо усунути?
5. За якими ознаками класифікують вуглецеві сталі?
6. Які структури мають відпалені сталі при кімнатній температурі?
7. На які групи поділяються конструкційні вуглецеві сталі?
8. Яким чином за маркою якісної конструкційної сталі можна визначити її структуру?
9. Наведіть приклади марок сталей і поясніть, що означають числа і літери в марках.
10. Як змінюються структура та властивості сталей із збільшенням вмісту вуглецю?
11. Що таке автоматні сталі? Наведіть приклади марок таких сталей.
12. На які групи поділяються інструментальні сталі, як їх маркують?
13. Які деталі виробляють з інструментальної сталі?
14. Наведіть приклади маркування котельних сталей.

## РОЗДІЛ 5

### ЧАВУНИ

*Чавун* – це сплав заліза з вуглецем при його вмісті від 2, 14 до 6,67 %. Як і сталь, це багатокомпонентний сплав, який, крім заліза та вуглецю, містить 1-3,5 % Si, 0,5-1,4 % Mn, а також сірку, фосфор, газу. Сірка, як і в сталі, є шкідливою домішкою, її вміст обмежений (не вище 0,1-0,2 %, а частіше ~ 0,03 % і менше). Допустима кількість фосфору дещо вища (0,2 %, а в деяких випадках до 0,4-0,5 %), оскільки цей елемент покращує рідко текучість, а чавуни – це ливарні сплави.

#### 5.1 Структури білих чавунів

В залежності від стану вуглецю чавуни поділяють на білі та сірі.

Вуглець у білому чавуні може частково або увесь знаходитися у зв'язаному стані у вигляді карбиду заліза  $\text{Fe}_3\text{C}$  (цементиту). Ці сполуки, у свою чергу, можуть бути в різних евтектоїдних (перліту), евтектичних (ледебуриту) сумішах з цементитом (у цих випадках чавуни мають різну ґратку і фазовий склад) або чисто цементитом.

За ДСТУ 2891-94: білий чавун (структурнобілий чавун) – чавун, який має після тверднення ледебуритно-карбідно-перлітну структуру і не містить видимих під мікроскопом включень графіту.

Свою назву білий чавун отримав за сріблясто-білий колір злому, який надає йому цементит. Цементит дуже твердий (800-900 НВ) і зносостійкий, тому не піддається обробці різанням звичайним різальним інструментом (крім абразивного інструменту). Тому білі чавуни мають обмежене застосування в техніці.

Залежно від кількості вуглецю білі чавуни поділяють згідно з діаграмою стану на доевтектичні (від 2,14 до 4,3 % вуглецю), евтектичні (4,3 %С) і заевтектичні (від 4,3 до 6,67 %С).

Мікроструктура доевтектичного чавуну має три структурні складові: перліт, ледебурит і вторинний цементит (рис. 5.1, а). Перліт спостерігається у вигляді темних зерен, а ледебуриту – у вигляді окремих ділянок. Кожна така ділянка являє собою суміш дрібних заокруглених або витягнутих зерен перліту, рівномірно розміщених в

білій цементитній основі. Зі збільшенням концентрації вуглецю в доєвтектичному чавуні доля ледебуриду в структурі збільшується за рахунок зменшення ділянок, зайнятих перлітом і вторинним цементитом. Вторинний цементит спостерігається у вигляді світлих зерен.

Евтектичний чавун складається з ледебуриду, тобто рівномірною механічною сумішшю перліту з цементитом (рис. 5.1, б).

Заєвтектичний чавун характеризується двома структурними складовими – первинним цементитом і ледебуридом (рис. 5.1, в). Зі збільшенням вуглецю кількість первинного цементиту в структурі зростає.

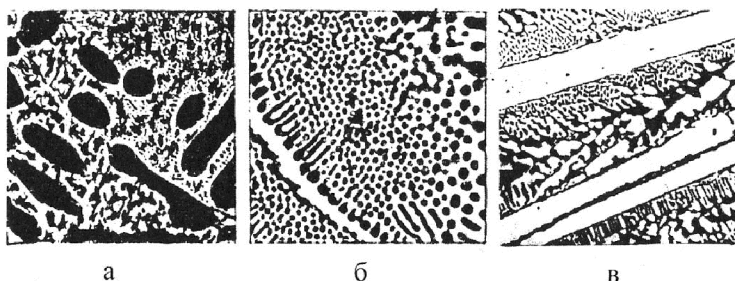


Рис. 5.1. Мікроструктура білого чавуну з різним вмістом вуглецю:

а – доєвтектичний ( $C < 4,3 \%$ ); б – евтектичний ( $C = 4,3 \%$ );  
в – заєвтектичний ( $C > 4,3 \%$ );  $\times 450$

Як вже відмічалось, білий чавун дуже крихкий та твердий, важко піддається обробці різанням і в практиці застосовується рідко (як правило, використовують для одержання ковкого чавуну). Границя міцності білих чавунів при розтягненні становить  $\sigma_s = 200 \dots 400$  МПа, при стисканні  $\sigma_s = 1000 \dots 1600$  МПа, твердість за Роквеллом складає  $30 \dots 68$  HRC. Температура плавлення білого чавуну  $1180 \dots 1220^\circ\text{C}$ .

Найстійкішими проти спрацювання є чавуни леговані, які містять  $12 \dots 24 \%$  Cr. Чавуни із  $34 \%$  Cr і  $1,5 \dots 2,2 \%$  C корозійностійкі в кислотах, лугах і морській воді та жаростійкі при температурі до  $1200^\circ\text{C}$ .

У промисловості використовуються в основному так звані відбілені чавуни – виливки з сірого чавуну з шаром білого чавуну у

вигляді твердої корки на поверхні. Із них виливають валки прокатних станів, катки для мощення доріг, стрілки трамвайних рейок, бандажі вагонних коліс, лопаті дробометних апаратів, ковші пес кометних голівок, кулі різних млинів, зносостійке наплавлення леза ножів бульдозерів та ін.), які можуть бути оброблені тільки абразивним інструментом.

Відбілювання на деяку глибину (12...30 мм) отримують шляхом швидкого охолодження поверхні (наприклад, виливанням чавуну в металеві або піщані форми). Для зняття структурних напружень, які можуть призвести до утворення тріщин, виливки піддають нагріванню при 500...550 °С. Висока зносостійкість відбілених чавунів обумовлена твердістю поверхні, що досягає 400...500 HV.

Для збільшення зносостійкості білі чавуни легують хромом, ванадієм, молібденом та іншими карбідоутворюючими елементами. Маркування білих чавунів стандартом не встановлюється .

## 5.2 Структури сірих чавунів

Сірий чавун, на відміну від білого, у своєму складі має вуглець у вільному стані у вигляді графітних лусочок.

Вуглець у вигляді графіту виділяється тільки при дуже повільному охолодженні сплаву; якщо ж охолодження відбувається у природних умовах, то виділяється не графіт, а цементит і утворюється білий чавун.

Своєю назвою сірий чавун зобов'язаний сірому кольору злому завдяки присутності графіту. Сірий чавун застосовують виключно для виробництва виливків. У промисловості застосовують доєвтектичні сірі чавуни (ливарні).

Сірий чавун, який складається з фериту і графіту, називають феритним; фериту, перліту і графіту – феритно-перлітним; з перліту і графіту – перлітним (рис. 5.2). Графіт у цих структурах знаходиться у вигляді лусочок пластинчастої форми.

Іноді в структурі чавуну поряд з графітом спостерігається ледебурит. Такий сіро-білий чавун називають половинчастим.

Графіт має дуже малу міцність порівняно з металевою основою, тому його можна розглядати як тріщини (надрізи), які створюють концентрацію напружень у металевій основі чавунів. Чим

більш заокруглені дрібні та рівномірно розміщені графітові включення, тим міцніший та пластичніший чавун. Наявність графіту у чавунах підвищує їх стійкість проти зношування і здатність поглинати вібрації.



Рис. 5.2. Структури сірих чавунів ( $\times 100$ ): графіт та металева основа зі структурою фериту (а), перліту (б) та перліту і фериту (в)

Сірі чавуни виплавляють зі спеціально підготовленої шихти у різних плавильних агрегатах (вагранках, електропечах). Особливостями будови сірих чавунів зумовлюються їх достатньо низьких механічних властивостей.

Механічні властивості сірого чавуну обумовлюються будовою його металічної основи, а також кількістю, формою і розміщенням включень графіту. Найвищу міцність має перлітний чавун. Щоб підвищити міцність, чавун легують (нікелем, хромом, молібденом, міддю та ін.), а також модифікують (сілікокальцієм, феросиліцієм), відпалюють, загартовують і відпускають.

За ГОСТ 1412-87 (Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки) сірий чавун маркують літерами СЧ з додаванням двох цифр, які характеризують мінімальне значення тимчасового опору на розтяг (границі міцності) у МПа  $\cdot 10^{-1}$  (кгс/мм<sup>2</sup>).

ГОСТ 1412-87 встановлює такі марки сірого чавуну у відливках: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35. За вимогою замовника для виготовлення виливків допускаються марки чавунів СЧ18, СЧ21 та СЧ24. Чавуни марок СЧ25 – СЧ35 одержують модифікуванням (перед розливанням у форми). У таблиці 5.1 наведено хімічний склад основних марок чавунів.

Таблиця 5.1. Хімічний склад основних сірих чавунів

Марка чавуну	Масова частка елементів, %				
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
				не більше	
СЧ 10	3,5 - 3,7	2,2 - 2,6	0,5 - 0,8	0,3	0,15
СЧ 15	3,5 - 3,7	2,0 - 2,4	0,5 - 0,8	0,2	0,15
СЧ 20	3,3 - 3,5	1,4 - 2,4	0,7 - 1,0	0,2	0,15
СЧ 25	3,2 - 3,4	1,4 - 2,2	0,7 - 1,0	0,2	0,15
СЧ 30	3,0 - 3,2	1,3 - 1,9	0,7 - 1,0	0,2	0,12
СЧ 35	2,9 - 3,0	1,2 - 1,5	0,7 - 1,1	0,2	0,12

Сірі чавуни використовують у верстатобудуванні (кожухи, станини верстатів, кришки, корпуси редукторів, гідронасосів і компресорів, фланці). В автомобільній та сільськогосподарській промисловості з них виготовляють картери, блоки циліндрів, гільзи блоків, колінчасті та розподільні вали, зубчасті колеса.

Феритні сірі чавуни призначені для мало- та середньо навантажених виробів, феритно-перлітні – для деталей, що працюють при підвищених статичних і динамічних навантаженнях. Перлітні використовують в умовах високих навантажень або значного зносу.

### 5.3 Вплив хімічного складу чавунів та швидкості охолодження на їх структуру

Розглянемо фактори, які впливають на структуроутворення, а отже, і на властивості чавунів.

Більша частина вуглецю у сірому чавуні перебуває у вигляді лусочок графіту, який частково роз'єднує металеву основу і тому надає чавуну крихкості. Вміст вуглецю в сірому чавуні не перевищує 4 %, міцні чавуни містять 2,8-3 % вуглецю. При збільшенні вмісту вуглецю чавун стає більш рідкотекучим.

Діаграма стану Fe-Fe<sub>3</sub>C характеризує білі чавуни, в яких весь вуглець виділяється у вигляді цементиту. Для виділення вуглецю у вигляді графіту в чавун додають графітоутворюючі елементи, і в першу чергу підвищують вміст кремнію. Треба відзначити, що сам вуглець належить до графітоутворюючих елементів, тому структура чавуну зумовлюється перш за все вмістом вуглецю та кремнію.

Зрозуміло, що залежно від кількості вуглецю, який виділився у вигляді графіту, змінюється структура металевої основи.

Якщо весь вуглець зосереджений в графіті, металева основа – феритна. У разі часткового виділення вуглецю у вигляді графіту структура основи, залежно від вмісту вуглецю, розчиненого в аустеніті, може бути ферито-перлітною або перлітною.

Отже, *кремній* у великій мірі сприяє графітізації, збільшує рідкотекучість, знижує температуру плавлення і сповільнює охолодження чавуну. Кількість кремнію у сірому чавуні коливається у межах від 0,75 до 3,75%.

*Марганець* сприяє відбіленню чавуну, паралізує шкідливий вплив сірки, поліпшує рідкотекучість чавуну, зміцнює чавун. Кількість марганцю допускається до 1,3 %.

*Сірка* також сприяє відбіленню, надає чавуну крихкості, знижує рідкотекучість чавуну. Тому сірка – шкідлива домішка і гранично допустимий вміст її в чавуні – 0,07%.

*Фосфор* створює в чавуні тверду і крихку евтектику, тому в чавунних деталях, які працюють на стирання, до 0,7 % фосфору. Фосфор знижує температуру плавлення чавуну, збільшує рідкотекучість і зменшує усадку. Тому чавун, що містить до 1,2 % фосфору, застосовують для художнього лиття.

На рисунку 5.3 наведена діаграма залежності структури чавуну від вмісту кремнію.

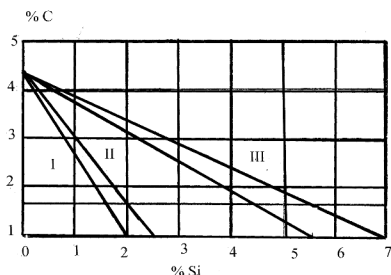


Рис. 5.3. Діаграма залежності структури чавуну від вмісту кремнію

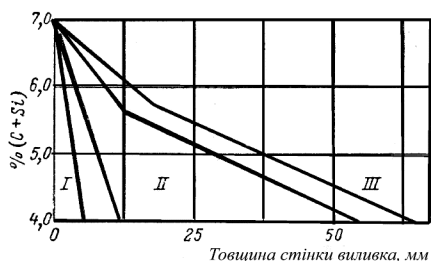


Рис. 5.4. Діаграма залежності структури чавуну від товщини стінки виливка

На цій діаграмі вміст вуглецю обмежений 4,3 %, оскільки в промисловості найширше використовуються до евтектичні чавуни з вмістом вуглецю 2,4 - 3 %. У зоні I є ледебурит. Між зоною I та II спостерігається структура половинчастого чавуну, який у структурі має ледебурит та графіт. У зоні II знаходиться структура П + Г, у зоні III – структура Ф + Г, а між ними – структура Ф + П + Г.

Швидкість охолодження також впливає на графітизацію чавуну: зі збільшенням швидкості охолодження графітизація зменшується і може відбутися відбілювання чавуну. Швидкість охолодження виливків залежить від товщини стінок: тонкостінні виливки охолоджуються швидше, ніж товстостінні.

На рисунку 5.4 приведена діаграма залежності структури чавуну від товщини стінки виливка: тонкостінні виливки охолоджуються швидше, ніж товстостінні. Тобто, структура чавуну залежить від швидкості охолодження.

#### 5.4 Ковкий чавун

Ковкий чавун – умовна назва м'якого і в'язкого чавуну, який одержують спеціальним *графітизуючим* відпалом білих доевтектичних чавунів з вмістом 2,2-3,2% C, 0,7-1,5% Si, 0,4-0,6% Mn.

В процесі відпалу цементит розпадається на залізо та графіт пластівчастої форми. Його не кують, але він досить пластичний, на відміну від сірого чавуну, тому й називається ковким. Ковкий чавун, як і сірий, має металеву основу: феритну, перлітну та феритно-перлітну (рис. 5.5).

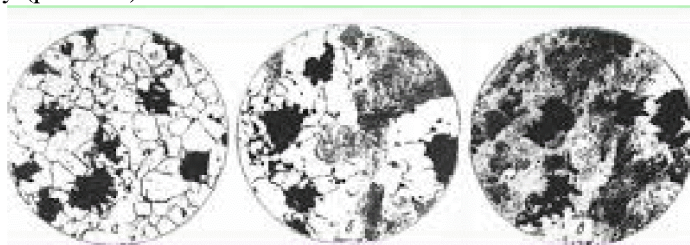


Рис. 5.5. Структура ковкого чавуну:

- а) на феритній основі; б) на феритно-перлітній основі;  
в) на перлітній основі



Залежно від способу відпалу можна одержати ковкий чавун на феритній основі (чорносерцевинний) та перлітній основі (білосерцевинний). Щоб одержати чорносерцевинний ковкий чавун, виливки з білого чавуну завантажують у ящики з вогнетривкої сталі та засипають піском (нейтральне середовище). Ящики нагрівають до температури 950 °С, при якій евтектичний цементит розпадається – це перша стадія графітизації. Після цього виливки повільно охолоджуються нижче від температури точки  $A_1$  (727 °С) до повного розпаду цементиту. Структурою ковкого чавуну є ферит із включеннями графіту у формі пластівців. У зломі такий чавун має чорний колір.

Білосерцевинний чавун одержують зневуглицьовувальним відпалом (томлінням). Виливки з білого чавуну засипають у ящиках рудою або окалиною (окислювальне середовище). На першій стадії графітизації при температурі 1000 °С вуглець відпалу з поверхневих шарів вилівка в значній мірі вигоряє. Друга стадія – переведення через точку  $A_1$  і охолодження (це відбувається досить швидко), в результаті чого металевою основою чавуну стає перліт. У зломі такий чавун білий.

Відпал триває кілька десятків годин. Режим відпалу на феритний чавун показаний кривою 1, на перлітний – кривою 2 (рис. 5.6).

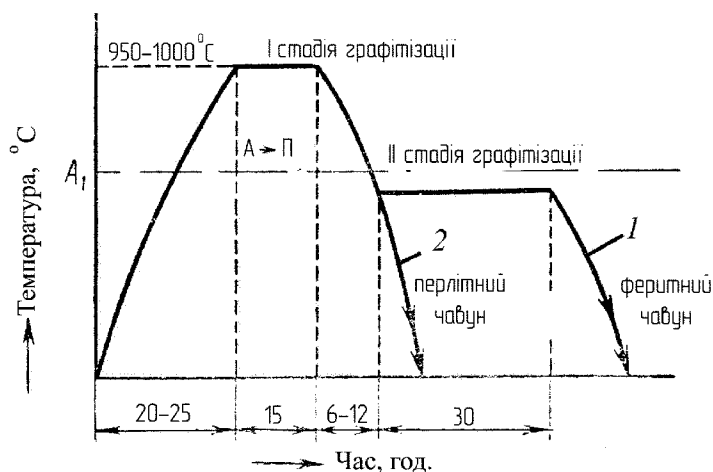


Рис. 5.6. Режим відпалювання на феритний (1) і перлітний (2) ковкий чавун

Ковкі чавуни з пластівчастим графітом (ГОСТ 1215-79. Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия) позначають літерами КЧ (ковкий чавун) і числами. Перше число відповідає мінімальному значенню  $\sigma_B$  (МПа $\cdot 10^{-1}$ ), друге – мінімальному значенню відносного видовження (%).

Згідно ГОСТ в залежності від складу мікроструктури металевої основи ковкий чавун поділяють на феритний (Ф) та перлітний (П) класи. Виливки виготовляють наступних марок:

КЧ30-6; КЧ33-8; КЧ35-10; КЧ37-12 феритного класу, який характеризується феритною або ферито-перлітною будовою мікроструктурної металевої будови.

КЧ45-7; КЧ50-5; КЧ55-4; КЧ60-3; КЧ65-3; КЧ70-2; КЧ80-1,5 перлітного класу, яка характеризується в основному перлітною мікроструктурою металевої основи.

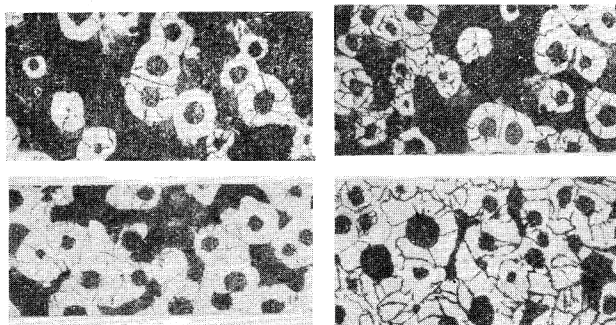
Ковкі чавуни при достатній міцності мають вищу пластичність порівняно з сірими. Їх застосовують у текстильній, автомобільній та сільськогосподарській промисловості для виготовлення гальмівних колодок, ступиць, муфт, деталей кермового управління, ланок ланцюгів тощо.

Феритні ковкі чавуни використовують для деталей, що працюють в умовах значних статичних та динамічних навантажень, перлітні – для виробів, що експлуатуються у важких умовах зношування, дії ударних і знакозмінних навантажень.

## 5.5 Високоміцний чавун

Високоміцний чавун отримують введенням у рідкий сірий чавун магнію, церію (або ітрію) і феросиліцію. Значна частина модифікатора при цьому окислюється, або зв'язується з сіркою і тільки 0,04-0,05 % вступає у взаємодію з компонентами чавуну, утворюючи кулястий (сфероїдальний) графіт. Процес модифікації триває 20-120 сек. У високоміцного чавуну феритна, феритно-перлітна та перлітна металева основи, він має підвищену пластичність ( $\delta = 2-17\%$ ) і ударну в'язкість.

Нижче (рис. 5.7) наведені структури високоміцних чавунів (а) та їх схематичне зображення (б)



*a*



*б*

Рис. 5.7. Структури високоміцних чавунів (а) та їх схематичне зображення (б)

Високоміцні чавуни (ДСТУ 3925-99 або ГОСТ 7293-85) з кулястим графітом (ВЧКГ) маркують літерами ВЧ і цифрами: ВЧ350-22, ВЧ450-22, ВЧ1000-2, які характеризують мінімальне значення  $\sigma_b$  (МПа  $\cdot 10^{-1}$ ), друге – мінімальному значенню відносного видовження  $\delta$  (%). ГОСТом передбачене таке маркування високоміцного чавуну: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ 80, ВЧ100, де цифри – межа міцності на розтяг.

Високоміцні чавуни мають найкращі механічні властивості, тому їх часто застосовують як заміник сталі. З них виготовляють вироби відповідального призначення – станини прокатних станів, преси та молоти, прокатні валки, диски муфт, важко навантажені шестерні, колінчасті вали, до яких ставлять високі вимоги щодо статичної та втомної міцності. Феритні ковкі чавуни характеризуються високою пластичністю, ударо- і холодостійкістю, перлітні – високим опором дії статичних та циклічних навантажень. Узагальнені данні про використання деяких чавунів наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Властивості та використання чавунів у промисловості

Структура	Марки	Властивості			Призначення
		σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	НВ	
Сірі					
Ф	СЧ10 СЧ15	100 150	- -	90 140	Супорти, картери, маховики, кришки, диски зчеплення, гальмівні барабани, фланці
Ф + П	СЧ20 СЧ25	200 250	- -	230 245	Станини верстатів, зубчасті колеса, блоки та гільзи циліндрів, поршні, фундаментні плити
П	СЧ30 СЧ35	300 350	- -	260 275	Розподільні вали, гільзи блоків циліндрів, деталі гідроприводів, корпуси насосів, зубчасті колеса
Ковкі					
Ф	КЧ30-6 КЧ33-8	294 323	6 8	100-163 100-163	Фланці, муфти, глушники, картери
Ф + П	КЧ35-10 КЧ37-12 КЧ45-7	333 362 441	10 12 7	100-163 110-163 150-207	редукторів, гайки, водяна та газова арматура, важелі
П	КЧ50-5 КЧ70-2 КЧ80-1,5	490 686 784	5 2 1,5	170-230 241-285 270-320	Шатуни, кронштейни, вилки карданних валів, ступиці, кільця ланцюгів, гальмівні колодки, деталі кермового управління
Високоміцні					
Ф	ВЧ350-22 ВЧ400-15	350 400	22 15	140-170 140-202	Валки гарячого прокатування, рами та станини прокатних станів і пресів, колінчасті вали дизелів, поршні, поршневі кільця, розподільні вали, блок-картери, головки циліндрів, шатуни, зубчасті колеса, труби, ковальське обладнання
Ф + П	ВЧ450-10 ВЧ500-7	450 500	10 7	140-225 153-245	
П	ВЧ600-3 ВЧ800-2 ВЧ1000-2	600 800 1000	3 2 2	192-277 228-302 270-360	

## 5.6 Чавуни з вермікулярним графітом, антифрикційні та спеціальні чавуни

Виробляють ще один вид графітизованого чавуну – з *вермікулярним* графітом (від лат. *vermiculus* – хробачок), тобто з графітом, який, порівняно з сірим, дещо грубіший і має округлені краї пластинок. Цей чавун менш поширений.

Чавуни з вермікулярним графітом (ЧВГ) маркуються за тим же принципом, що й високоміцні: ЧВГ300-4, ЧВГ400-4 тощо (ДСТУ 3926-99 або ГОСТ 28394-89).

Чавуни з вермікулярним графітом за властивостями поступаються високоміцним, але вони дещо дешевші. Їх використовують для корпусних деталей, деталей верстатів та пресового-ковальського обладнання, махових коліс, гідроцильних деталей насосів високого тиску.

Сірі, ковкі, високоміцні чавуни можуть використовуватися як антифрикційні матеріали (втулки, підшипники ковзання, поршневі кільця тощо). Такі чавуни маркують літерами АЧ (антифрикційний чавун), далі вказують вид чавуну (С – сірий, В – високоміцний, К – ковкий) та порядковий номер (1- 6), наприклад: АЧС-1, АЧВ-2, АЧК-1 (ГОСТ 1585-85).

При певних умовах експлуатації використовують леговані чавуни зі спеціальними властивостями (зносостійкі, корозійностійкі, жаростійкі тощо). Такі чавуни легують хромом, кремнієм, алюмінієм, нікелем, міддю. Їх маркують таким чином: літера Ч (чавун), за якою йде літера, що позначає легувальний елемент (як у сталях). Число (вміст елемента у відсотках). Якщо в кінці марки стоїть Ш, це означає графіт кулястої форми (від російського «шаровидный»). Приклади марок чавунів зі спеціальними властивостями (ГОСТ 7769-82): ЧХ22, ЧХ3Т – зносостійкі; ЧХ2, ЧС5Ш, ЧЮХШ – жаростійкі; ЧЮ22Ш, ЧЮ30 – жаростійкі та зносостійкі при підвищених температурах; ЧС15 (феросилід), ЧС17М3 – корозійностійкі у рідкому середовищі; ЧН15Д7 (нірезист) – зносостійкий у двигунах та маломагнітний; ЧН20Д2Ш – жароміцний, холодостійкий, маломагнітний і т. ін.

## ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке чавун?
2. Чим відрізняється білий чавун від сірого?
3. Які фактори впливають на структуру чавуну?
4. Як впливають домішки на графітизацію чавуну?
5. Як впливає швидкість охолодження на структуру чавуну при постійному хімічному складі?
6. Які структури мають білі та сірі чавуни?
7. Якою може бути структура металевої матриці графітизованих чавунів?
8. Чим відрізняються сірі, ковкі та високоміцні чавуни?
9. Яку форму мають графітні включення у сірих, ковких та високоміцних чавунах?
10. Як отримують ковкі чавуни?
11. Як отримують високоміцні чавуни?
12. Як маркуються сірі, ковкі та високоміцні чавуни? Галузь їх застосування.
13. Як маркуються чавуни з вермікулярним графітом, антифрикційні та леговані чавуни зі спеціальними властивостями?

## РОЗДІЛ 6

### ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

#### 6.1 Поняття термообробки

Механічні властивості металів можна значно поліпшити термічною обробкою. Наукові основи термічної обробки були закладені Д.К.Черновим у 1968 р. відкриттям критичних температур, за яких відбуваються фазові перетворення при нагріванні та охолодженні сталі, та побудовою на їх основі діаграми стану системи залізо-вуглець.

Термічна обробка (ТО) полягає у нагріванні сталі до вибраної температури, витримки для рівномірного прогріву виробу та завершення фазових перетворень і подальшому охолодженні з певною швидкістю. Таким чином, головні параметри ТО – температура нагрівання  $t$ , час витримки  $t$ , швидкість охолодження  $V_{ox}$ .

*Мета термічної обробки* – отримати необхідну структуру для забезпечення потрібних властивостей без зміни хімічного складу сталі.

Графік видів термічної обробки сталей наведений на рисунку 6.1.

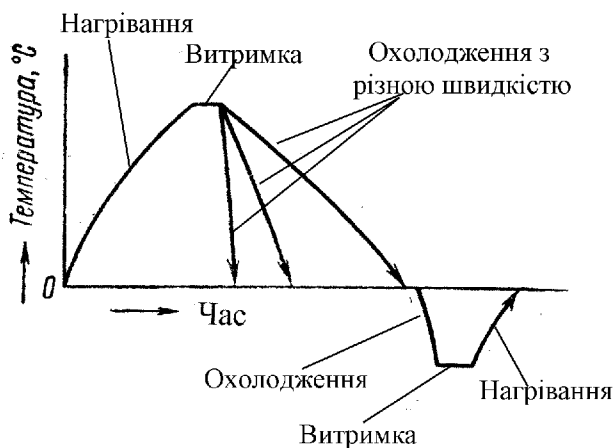


Рис. 6.1. Графік термічної обробки сталі

## 6.2 Класифікація видів термічної обробки (за А. А. Бочваром)

За класифікацією А.А.Бочвара всі види термічної обробки можна поділити на:

- 1) відпал першого роду (рекристалізаційний);
- 2) відпал другого роду (з фазовою перекристалізацією);
- 3) гартування;
- 4) відпуск та старіння.
- 5) хіміко-термічна обробка

## 6.3 Перетворення при нагріванні сталі (процес аустенізації)

Основою для вивчення термічної обробки сталей є діаграма залізо – цементит.

Згідно з діаграмою Fe-Fe<sub>3</sub>C при нагріванні в сталі відбуваються фазові перетворення, температурам яких відповідають критичні точки (рисунк 6.2). Їх позначають буквами *A* з цифровими індексами (*A*<sub>1</sub>, *A*<sub>2</sub>, *A*<sub>3</sub>). Точка *A*<sub>1</sub> дорівнює 727 °С (лінія *PSK* на діаграмі Fe-Fe<sub>3</sub>C ), *A*<sub>2</sub> – точка Кюрі (768 °С), *A*<sub>3</sub> – це лінія *GSE*. Для заєвтектоїдної сталі точка *A*<sub>3</sub> (відрізок *SE*) позначається *A*<sub>cm</sub>.

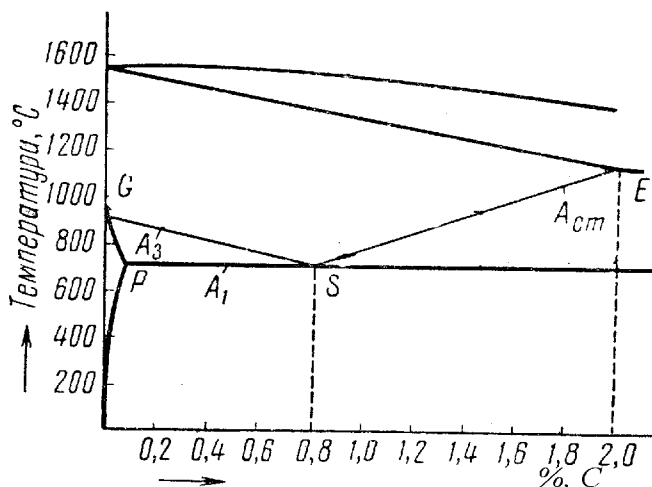


Рис. 6.2. Критичні точки діаграми "залізо-вуглець"



Розрізняють критичні точки при нагріванні та при охолодженні. Їх позначають відповідно індексами  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$  та  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$ . Точка  $A_{c1}$  характеризує початок утворення аустеніту при нагріванні,  $A_{c3}$  – закінчення цього процесу. Точка  $A_{cm}$  відповідає закінченню розчинення цементиту в аустеніті. Вище  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ) в сталі існує повністю аустенітна структура. Точка  $A_{r3}$  означає початок виділення фериту з аустеніту при охолодженні,  $A_{r1}$  – закінчення розпаду аустеніту в перліт. Для евтектоїдної сталі критичні точки  $A_1$  та  $A_s$  співпадають (точка  $S$  на діаграмі).

Розглянемо процеси, які приводять до утворення аустеніту, на прикладі евтектоїдної сталі зі структурою перліту. В доевтектоїдній та заевтектоїдній сталях процеси аналогічні, але вони ускладнюються присутністю надлишкових фаз.

Утворення аустеніту починається при температурі вище рівноважної  $727^\circ\text{C}$ . Цей процес здійснюється в дві стадії:

- 1) поліморфне  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення (гратка ОЦК перетворюється в ГЦК);
- 2) розчинення карбідів в аустеніті і перерозподіл вуглецю в твердому розчині.

В результаті цих двох процесів перліт, який складається з фериту з кількістю вуглецю  $0,03\%$  та цементиту з кількістю вуглецю  $6,67\%$  перетворюється на аустеніт. Вміст вуглецю в якому дорівнює його середньому вмісту в сталі. Схематично процеси, які відбуваються при нагріванні евтектоїдної сталі, показані на рисунку 6.3.

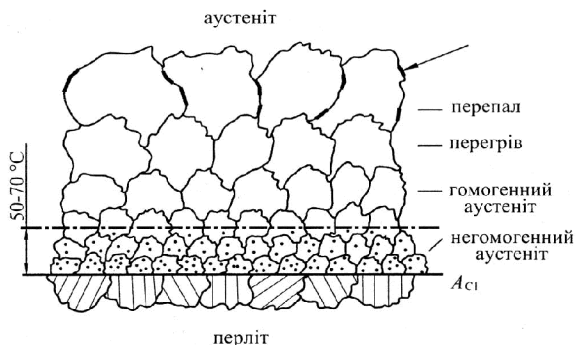


Рис. 6.3. Схема перетворення перліт  $\rightarrow$  аустеніт при нагріванні евтектоїдної сталі

З наведеної схеми видно, що після нагрівання вище точки  $A_{cl}$  в аустеніті ще зберігаються нерозчинені частинки цементиту (на схемі показані точками). Внаслідок цього вміст вуглецю в аустеніті менше його концентрації в сталі (0,8 %).

До того ж спочатку аустеніт неоднорідний (негомогенний): у місцях, що відповідали фериту у перліті, кількість вуглецю менша, ніж у місцях, де були цементитні частинки. З розчиненням карбідів і дифузійним вирівнюванням концентрації вуглецю при підвищенні температури аустеніт стає гомогенним з вмістом вуглецю 0,8 %, який відповідає складу сталі.

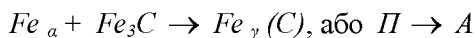
В доєвтектоїдних сталях, згідно діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C, після аустенітного перетворення структура складається з двофазної суміші фериту і аустеніту. З підвищенням температури в між критичному інтервалі (між лініями  $PS$  та  $GS$ ) все більша кількість фериту перетворюється в аустеніт, та після досягнення точки  $A_{c3}$  та гомогенізації концентрація вуглецю в аустеніті дорівнює його середньому вмісту в сталі. В заєвтектоїдних сталях після утворення аустеніту з підвищенням температури відбувається поступове розчинення в ньому цементиту, і після нагрівання вище  $A_{cm}$  та гомогенізації структура сталі також складається з чистого аустеніту з концентрацією, рівною середньому вмісту вуглецю в сталі.

## 6.4 Чотири основні перетворення в сталі

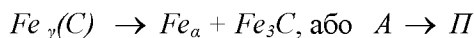
Фазові перетворення в сталі викликаються зміною умов (наприклад, температури), коли один стан виявляється менш стійким, ніж другий.

При термічній обробці сталі спостерігаються чотири основних перетворення:

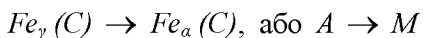
1) перетворення перліту в аустеніт (вище точки  $A_1 = PSK$ ):



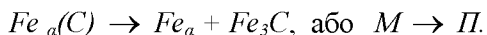
2) перетворення аустеніту в перліт при повільному охолодженні (нижче точки  $A_1 = PSK$ ):



3) перетворення аустеніту в мартенсит (нижче  $T^{\circ}\text{C} = 200^{\circ}\text{C}$ , точніше в діапазоні від  $+200^{\circ}\text{C}$  до  $-80^{\circ}\text{C}$ ) при швидкому охолодженні:



4) перетворення мартенситу у перліт (при усіх температурах):



## 6.5 Перше перетворення: $П \rightarrow А$ . Дійсне і спадкове зерно

При нагріванні сталі вище температури критичної точки  $A_1$  (лінія PSK діаграми залізо-цементит) відбувається перетворення перліту в аустеніт.

Початок перлітно-аустенітного перетворення супроводжується утворенням перших зерен аустеніту. Розмір цих зерен характеризує так звану *величину початкового зерна* аустеніту. Після закінчення перетворення перліту в аустеніт, як правило, утворюється дрібне аустенітне зерно. Підвищення температури в аустенітній області після закінчення утворення аустеніту та його гомогенізації супроводжується ростом аустенітних зерен.

Нагрівання до температур  $1000-1200^{\circ}\text{C}$  призводить до утворення дуже грубого зерна. Це називається *перегрівом*. При подальшому охолодженні з такого грубого зерна утворюються грубі структури, що погіршує властивості сталі.

Більш за все ріст аустенітного зерна впливає на показники в'язкості та температуру в'язко-крихкого переходу  $t_{кр}$ , тобто викликає окрихчення металу. Перегрів є видом браку, який можна виправити повторним нагріванням до температур на  $30-50^{\circ}$  вище критичних точок ( $Ac_3$ , для евтектоїдної сталі  $Ac_{1,3}$ ), яке супроводжується, як правило, подрібненням зерен.

Якщо ж нагріти сталь до температур, близьких до лінії солідусу, зерна аустеніту продовжують зростати, а межі зерен підправляються та окислюються. Такий вид браку називається *перепалом*. Він вважається невиправним браком, оскільки, незважаючи на подрібнення зерна при повторному нагріванні, метал залишається крихким через присутність на границях зерен крихких оксидів (на рис. 6.3 оксиди позначені стрілкою).

Залежно від схильності зерен аустеніту до росту розрізняють *спадково дрібнозернисті сталі* та *спадково грубозернисті сталі*. Перші характеризуються малою схильністю до росту зерна, другі – підвищеною схильністю.

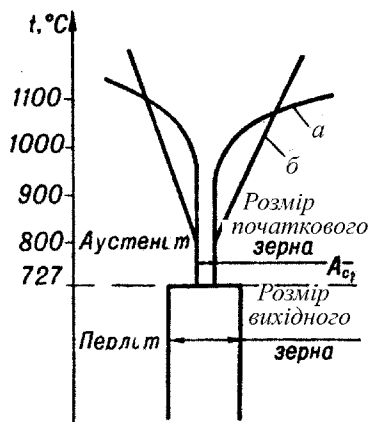


Рис. 6.4. Схема росту зерна у спадково грубозернистій і дрібнозернистій сталей

- а) дрібнозерниста сталь;
- б) крупнозерниста сталь

Схема росту зерна у спадково грубозернистій і дрібнозернистій сталей наведена на рисунку 6.4.

З рисунку видно, що при температурах трохи більших, ніж температура критичної точки  $A_{c1}$ , зерна аустеніту у спадково крупнозернистій сталі більші, ніж у спадково дрібнозернистій. При температурах значно більших у спадково дрібнозернистій сталі зерно може виявитися більшим.

Слід розрізняти:

- *початкове* зерно аустеніту, тобто зерно, яке утворилося в момент

закінчення перлітно-аустенітного перетворення;

- *спадкове*, або *природне* зерно, яке характеризує схильність зерна аустеніту до росту з підвищенням температури;
- *дійсне* зерно, тобто зерно, яке утворилося в даних умовах.

Саме дійсне зерно впливає на властивості сталі після термічної обробки: чим воно дрібніше, тим легше отримати поєднання високих показників міцності, пластичності, ударної в'язкості, в'язкості руйнування при низькій температурі в'язко-крихкого переходу. У виробництві намагаються використовувати саме спадково дрібнозернисті сталі.

Розмір зерна аустеніту оцінюють після нагрівання сталі до  $930^{\circ}\text{C}$  за спеціальними шкалами умовними номерами (балами, рис. 6.5). Сталі, в яких визначений після охолодження з цієї температури бал зерна 1 – 4, належать до крупнозернистих, сталі з балом зерна 5 – 8 – до спадково дрібнозернистих.

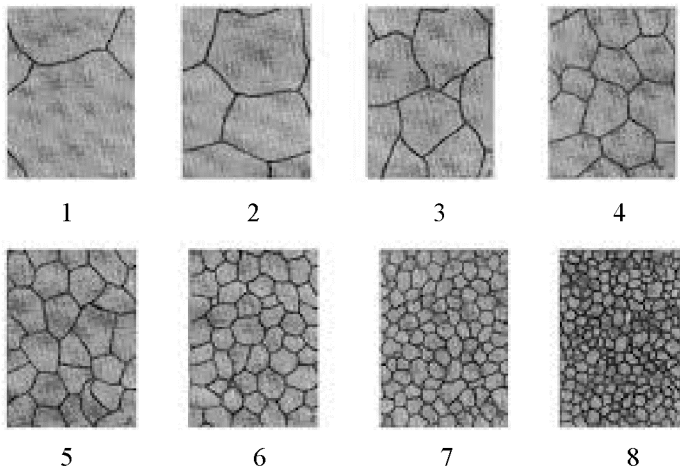


Рис. 6.5. Шкала для визначення розміру зерна

Спадковість до росту зерна впливає також на вибір температур, при яких здійснюються операції гарячої пластичної деформації. Для спадково дрібнозернистої сталі ця температура може бути вищою, що призведе до зниження зусиль деформування.

Тобто, на розмір аустенітного зерна впливають: хімічний склад сталі, температура та швидкість нагрівання, тривалість витримки при заданій температурі.

Спокійні сталі, додатково розкислені алюмінієм, а також сталі, які містять титан, ванадій, молібден, церій є спадково дрібнозернистими, оскільки ці елементи гальмують ріст аустенітного зерна. Киплячі сталі, які не мають вказаних домішок, зазвичай є крупнозернистими.

## 6.6 Перетворення в сталі при охолодженні (друге перетворення). Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту

В процесі охолодження сталі від температур аустенітного стану відбувається розпад аустеніту, який може відбуватися лише за температур, нижчих від критичної точки  $A_1$  (для вуглецевих сталей та чавунів –  $727^\circ\text{C}$ ), за умови, що вільна енергія аустеніту вища за вільну

енергію продуктів його перетворення (аустеніт має бути переохолодженим).

Для побудови діаграми ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту використовують прилад, який називається анізометром. Дія цього приладу заснована на тому, що аустеніт – це парамагнітна фаза, тоді як ферит – феромагнітна.

Зразки сталі нагрівають вище критичної точки  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ) для утворення стабільного аустеніту і переносять у ванну з температури нижче 727 °С (700, 600, 550, 400 і т. ін.). Ванну розміщують між полюсами магніту. Перенесені зразки витримують у ванні при кожній температурі до повного розпаду аустеніту (або припинення розпаду).

Поки аустеніт не розпадається, парамагнітні зразки не взаємодіють з магнітним полем. З початком виділення фериту зразок повертається в магнітному полі, намагаючись розташуватися вздовж магнітних ліній. Чим вищий ступінь розпаду аустеніту, тим більший кут повороту зразка. Між кутом повороту та кількістю аустеніту, що розпався, можна встановити зв'язок і побудувати криві розпаду залежно від часу витримки для кожної ізотерми. Ці криві (так звані кінетичні криві) й використовують для побудови діаграми розпаду аустеніту.

Отже, процес перетворення аустеніту при швидкому переохолодженні до певної температури та витримки при ній (ізотермічний процес) характеризується кінетичними кривими для різних ступенів переохолодження (рис. 6.6, *a*).

За умов невеликого переохолодження різниця вільних енергій аустеніту та продуктів розпаду незначна. Тому перетворення відбувається з певним періодом інертності. Тобто, існує інкубаційний період до початку перетворення, що дорівнює відстані від точки 0 до точки *a* на осі часу (рис. 6.6, *a*). Точка *a* кінетичної кривої відповідає початку перетворення (1% продуктів розпаду), а точка *b* – закінченню перетворення. Від ступеня переохолодження залежить тривалість інкубаційного періоду та швидкість перетворення. За малого ступеня переохолодження ( $t_1$ ) перетворення йде повільно внаслідок малої різниці вільних енергій аустеніту та продуктів розпаду. У разі зростання ступеня переохолодження швидкість стає оптимальною (при  $t_3$ ), а потім, за значного переохолодження (при  $t_4$ ,  $t_5$ ), швидкість знову зменшується у зв'язку з малою дифузійною рухливістю атомів.

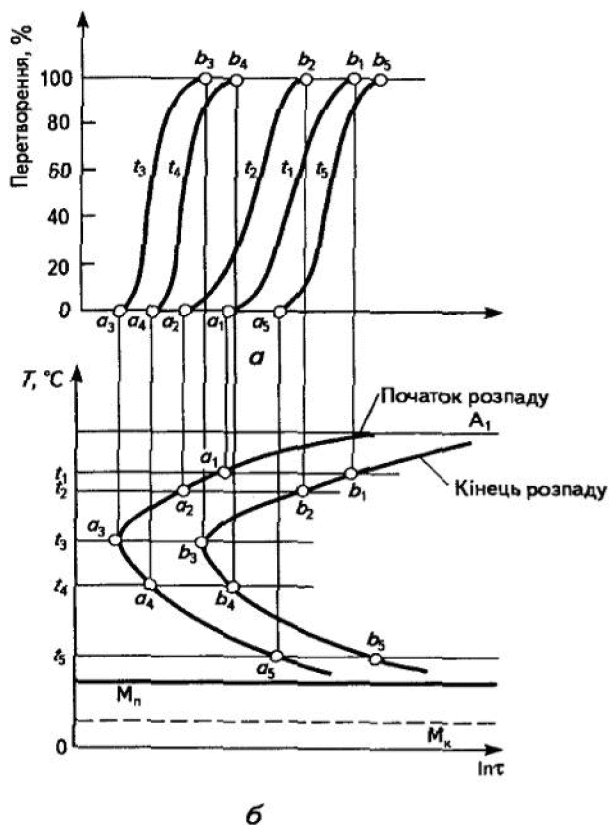


Рис. 6.6. Схема побудови кінетичних кривих (а) та діаграми ізотермічного перетворення аустеніту (б)

Ці й демонструють кінетичні криві (рис. 6.6, а), за якими можна побудувати діаграму ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 6.6, б). Для цього в координатах час (вісь абсцис) і температура розпаду аустеніту (вісь ординат) наносять точки  $a$  і  $b$  кінетичних кривих по мірі зниження температури. Поєднуючи точки  $a_1, a_2$  і т. п., одержують криву початку ізотермічного перетворення аустеніту (ліва крива діаграми), а поєднуючи точки  $b_1, b_2$  і т. п., праву криву закінчення перетворення. Одержані криві нагадують літеру С, тому їх ще називають С-кривими.

В області між вертикальною віссю і кривою початку перетворення аустеніт перебуває у переохолодженому стійкому стані. Мінімальний час існування переохолодженого аустеніту до початку його перетворення на продукти розпаду називають *стійкістю аустеніту* (час від 0 до  $a_3$  на рис. 6.6, б). Залежить вона головним чином від вмісту вуглецю та легуючих елементів та є важливою характеристикою при термічній обробці сталей. Оскільки розпад аустеніту може здійснюватись від кількох секунд до кількох годин, то для зручності побудови діаграми використовують логарифмічну шкалу часу. Отже, при охолодженні сталі нижче рівноважної точки  $A_1$  аустеніт буде нестійкий та з часом буде розпадатися на феритно-цементитну суміш (перліт, сорбіт, тростит, бейніт) різного ступеню дисперсності (подрібненості). Це дифузійний процес виходу вуглецю з ґратки.

На рис. 6.7 показані перетворення аустеніту евтектоїдної сталі (0,8 %C) при швидкому охолодженні та витримці при певних температурах.

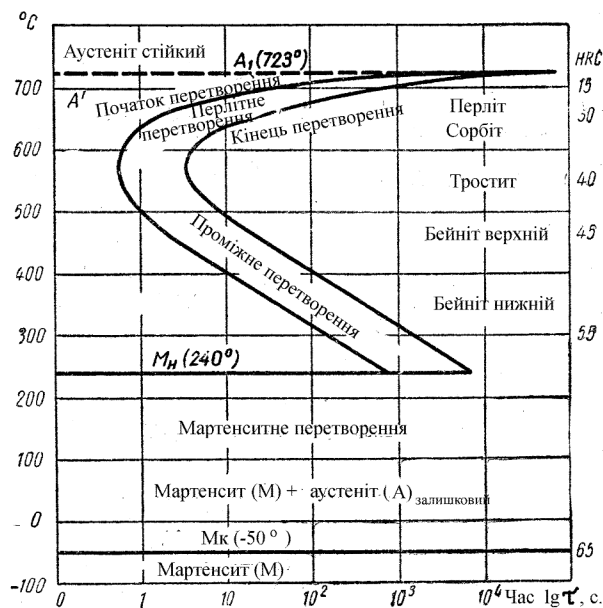


Рис. 6.7. Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту евтектоїдної сталі



Вище  $727^{\circ}\text{C}$  аустеніт *стійкий*, аустеніт, який існує ліворуч лінії початку перетворення – *нестійкий*. Час до початку розпаду аустеніту – це *інкубаційний період*.

В інтервалі температур  $727 - 550^{\circ}\text{C}$  аустеніт перетворюється у *феритно-карбідну суміш* пластинчастого типу, яка, залежно від температури перетворення, відрізняється дисперсністю (товщиною цементитних частинок і відстанню між ними) і називається *перлітом* (П), *сорбітом* (С), *троститом* (Т). Структури, що формуються в цьому інтервалі, об'єднуються єдиною назвою – структури перлітної родини. Реальні структури наведені на рис. 6.8.

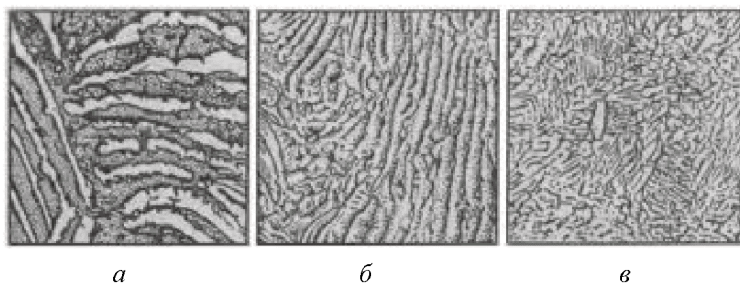


Рис. 6.8. Мікроструктури перліту (а), сорбіту (б), бейніту (в) при збільшенні 7500

Нижче температури  $550^{\circ}\text{C}$  формується структура, яка отримала назву *бейніт*. Це теж феритно-карбідна суміш (за умови повного розпаду аустеніту), яка має голчасту будову, а ферит дещо пересичений вуглецем (рис. 6.9, а).

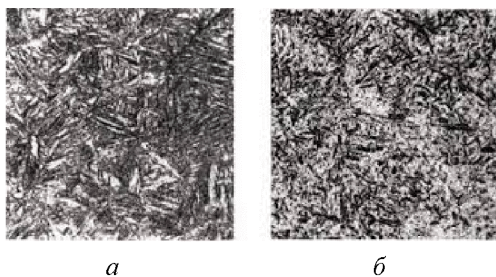
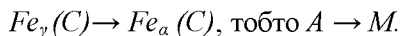


Рис. 6.9. Мікроструктури бейніту (а) та мартенситу (б)

## 6.7 Мартенситне перетворення (третє перетворення)

Якщо аустеніт переохолодити до температур, коли він нестійкий, то внаслідок низьких температур швидкості дифузії вуглецю дуже мала. Тому перебудова ґратки відбувається без виділення вуглецю з ґратки:



Перетворення є бездифузійним. Внаслідок цього перетворення утворюється мартенсит.

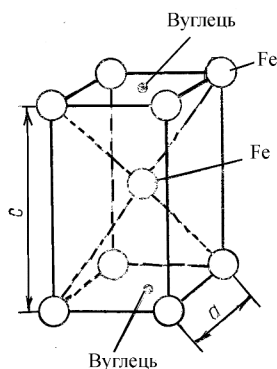


Рис. 6.10. Кристалічна ґратка мартенситу

*Мартенсит* – пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$  – залізі. Він має тетрагональну ґратку. Співвідношення  $c/a$  у ґратці мартенситу – більше 1 (рис. 6.10).

Перекручення кристалічної ґратки веде до підвищення твердості і зниження пластичності.

Мартенсит – найтвердіша й найкрихкіша структура. Твердість мартенситу становить 60-65 HRC, а пластичні властивості при розтягу ( $\delta$  і  $\psi$ ) та ударна в'язкість ( $KCU$ ) близькі до нуля. У зв'язку зі збільшенням об'єму сталі при мартенситному перетворенні виникають напруги, особливо при нерівномірному охолодженні деталі. Мартенсит має магнітні властивості (зберігає в собі магнетизм), тому заготовки магнітів загартовують на мартенсит.

*Критичною швидкістю гартування* ( $V_{кр}$ ) називається мінімальна швидкість охолодження, при охолодженні з якою утворюється чисто мартенситна структура.

Критична швидкість гартування залежить від стійкості переохолодженого аустеніту (тобто часу існування аустеніту до початку розпаду). Чим більше стійкість переохолодженого аустеніту, тим менше критична швидкість гартування.

На стійкість переохолодженого аустеніту впливають наступні фактори:

1) легуючі елементи (зменшують критичну швидкість гартування, тому що зрушують діаграму ізотермічного розпаду праворуч та затримують процес дифузії атомів вуглецю);

2) чим більше дійсне зерно аустеніту, тим менша критична швидкість гартування (феритно-цементитна суміш утворюється по межах зерен; отже, чим більше зерно, тим більше часу треба вуглецю на вихід до межі зерна);

3) з підвищенням вмісту вуглецю до 0,8 % критична швидкість гартування зменшується (вуглець, розчинений у аустеніті, знижує швидкість дифузії).

*Мартенситне перетворення* має деякі характерні риси, які відрізняють його від перетворень в перлітному та бейнітному інтервалах:

- мартенсит утворюється при швидкості охолодження більший за критичну;

- мартенситне перетворення відбувається без інкубаційного періоду;

- мартенситне перетворення здійснюється зі швидкістю, близько до швидкості звуку в сталі ( $\approx 5000$  м/с). При будь-якій температурі в інтервалі  $M_p - M_k$  з такою вибухоподібною швидкістю, виникає певна кількість мартенситу, і перетворення припиняється. Для його продовження необхідно знижувати температуру;

- питомий об'єм мартенситу більший, ніж аустеніту, тому при мартенситному перетворенні об'єм зразка збільшується;

- температура початку ( $M_p$ ) та кінця ( $M_k$ ) мартенситного перетворення не залежить від швидкості охолодження. Вона залежить від хімічного складу сталі. Чим більший вміст вуглецю, тим нижче температури  $M_p$  та  $M_k$  (рис. 6.7). Аналогічно на ці температури впливають й практично всі легуючі елементи (окрім кобальту).

При вмісті у сталі 0,6 %C температура кінця мартенситного перетворення знижується у область негативних температур, а тому при охолодженні цієї сталі до кімнатної температури в ній залишається підвищена кількість залишкового аустеніту (рисунки 6.11 та 6.12).

*Бейнітне перетворення.* В зоні температур між перлітним та мартенситним перетворенням утворюється перлітно-карбідна суміш, яка називається бейнітом. Механізм його формування поєднує риси бездифузійного та дифузійного перетворень. Тому бейнітне

перетворення також називають проміжним. Внаслідок низької температури розпаду дифузія вуглецю утруднюється, але повністю не припиняється. Тому ферит залишається дещо пересиченим вуглецем, хоча й менше, ніж мартенсит.

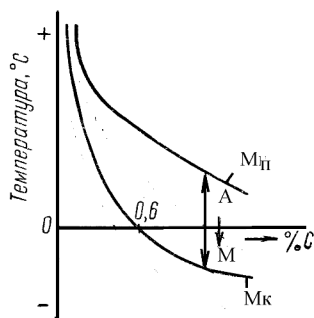


Рис. 6.11. Вплив вуглецю на положення температур мартенситного перетворення ( $M_{\Pi}$  і  $M_K$ )

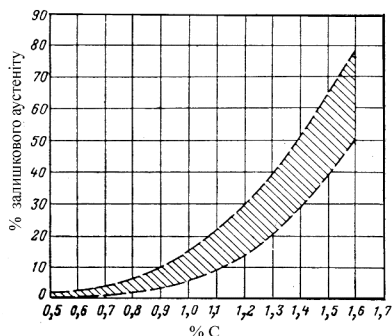


Рис. 6.12. Вплив вмісту вуглецю на кількість залишкового аустеніту в загартованій сталі

## 6.8 Вплив легувальних елементів на стійкість переохолодженого аустеніту

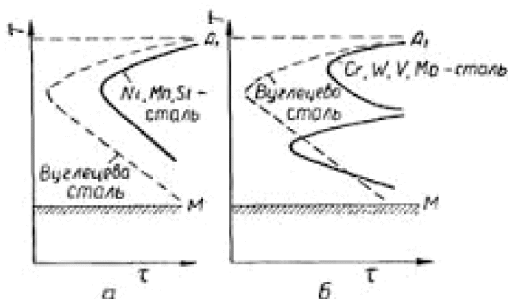


Рис. 6.13. Вплив легувальних елементів на діаграму ізотермічного розпаду:  
а – вуглецева сталь та сталь, легована некарбідоутворюючими елементами;  
б – вуглецева сталь та сталь, легована карбідоутворюючими елементами

Присутність в сталі легувальних елементів збільшує інкубаційний період, тобто зсуває С-подібні криві вправо, що призводить до зменшення критичної швидкості легування сталей порівняно з вуглецевими (рис. 6.13).

З цього випливає, що для одержання мартенситу у вуглецевій сталі, у який інкубаційний період малий, слід використовувати інтенсивніший охолоджувач, ніж для легованої. Як правило, вуглецеві сталі охолоджують у воді, а леговані – у оливі. Але при цьому слід враховувати рівень напружень, які виникають при утворенні мартенситу та можуть негативно впливати на властивості виробів. Докладніше це питання розглядатиметься у наступному розділі.

## 6.9 Перетворення при відпуску (четверте перетворення)

*Відпуском* сталі називається нагрівання загартованої сталі до температур нижче критичної точки  $A_1$  (727 °C), витримка та наступне охолодження на повітрі (щоб уникнути термічних напруг). Структура сталі після гартування складається з мартенситу й залишкового аустеніту. Обидві структурні складові є нестійкими, а тому при нагріванні будуть прагнути перейти у більш стійкий стан, тобто перетворитися.

Перше перетворення при відпуску полягає у перетворенні мартенситу гартування (тетрагонального) у мартенсит відпуску (з меншим ступенем тетрагональності). Перше перетворення відбувається в інтервалі температур 80-200 °C.

Друге перетворення при відпуску полягає у перетворенні залишкового аустеніту у мартенсит відпуску. Внаслідок часткового виділення вуглецю з мартенситу, його об'єм зменшується і тому при температурах відпуску 200-300 °C на процес розпаду мартенситу накладається процес розпаду залишкового аустеніту, який затиснутий між об'ємами мартенситу та зазнає стискування з усіх боків. Це перетворення є дифузійним.

Третє перетворення при відпуску в інтервалі температур 300-400°C полягає у остаточному розпаді мартенситу відпуску на феритно-цементитну суміш великого ступеню дисперсності, який називається троститом відпуску.

Четверте перетворення при відпуску пов'язане з коагуляцією часток і збільшенням блоків мозаїчної структури фериту. Пластинчастий цементит переходить у глобулярну (зернисту) форму, утворюючи суміш фериту і цементиту. Воно відбувається при температурах, більших 400 °C.

При температурах 500-600 °C структура феритно-цементитної

суміші має зернисту будову середнього ступеню дисперсності, яку називають сорбітом відпуску. При температурах 650-700 °С феритно-цементитна суміш має грубо-дисперсну зернисту будову та називається перлітом (розмір глобулярних часток цементиту становить від 0,3 до 0,4 мкм).

Різний розмір та форма частинок цементиту, одержаного в процесі відпуску загартованої сталі, зумовлює відмінності у її властивостях.

## ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. В чому полягає термічна обробка, яка її мета?
2. Наведіть класифікацію видів термічної обробки за А.А. Бочваром.
3. Наведіть стадії процесу утворення аустеніту.
4. Як змінюється зерно аустеніту при нагріванні та до чого це приводить?
5. Наведіть чотири основних перетворення в сталі.
6. Які сталі називають спадково дрібнозернистими та спадково крупнозернистими?
7. Поясніть поняття: початкове, спадкове та дійсне зерно.
8. Як оцінюється розмір зерна в сталях?
9. Що характеризує діаграма ізотермічного розпаду аустеніту та як її будують?
10. Назвіть перетворення, які відбуваються на лініях діаграми ізотермічного розпадань аустеніту.
11. Які структури належать до перлітної родини, з яких фаз вони складаються та чим відрізняються?
12. Що таке мартенсит? Які характерні риси має мартенситне перетворення?
13. Яка твердість сорбіту, троститу, бейніту, мартенситу?
14. Що називається критичною швидкістю охолодження при гартуванні?
15. Як фактори впливають на стійкість переохолодженого аустеніту?
16. Як визначити температуру нагрівання сталей для гартування?
17. Як впливають легувальні елементи на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту і критичну швидкість охолодження?
18. Що таке відпуск?

## РОЗДІЛ 7

### ОСНОВНІ ВИДИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

Як вже відмічалось у попередньому розділі, існують (за А. А. Бочваром) основні види термічної обробки, які по різному впливають на структуру та властивості сталі. Відпал, нормалізація та відпуск мають спільним те, що сталь нагрівається в аустенітний стан (вище критичних точок), а відрізняються швидкістю охолодження. Відпуск проводять при нагріванні нижче критичної точки  $A_1$ . Температури та умови проведення хіміко-термічної обробки будуть розглянуті у окремому розділі.

#### 7.1 Відпал

*Відпал* – термічна обробка, яка полягає в нагріванні сталі до певної температури (вище або нижче критичних точок), витримці при цій температурі і подальшому дуже повільному охолодженні (частіш за все разом з піччю). Відпал може супроводжуватися або не супроводжуватися фазовими перетвореннями.

*Метою відпалу є:* усунення наклепу, який виник при попередній обробці; зняття напружень після попередньої обробки (штампування, лиття); покращення оброблюваності різанням; виправлення структури після попередньої обробки (наприклад, подрібнення зерна перегрітої сталі); усунення ліквіації.

Як правило, відпал – це попередня обробка, хоча для крупногабаритних багатотонних виливків, особливо з легованих сталей, така обробка використовується як кінцева.

Швидкість охолодження при відпалі повинна забезпечити перетворення аустеніту у феритно-цементитну суміш, тобто, у перліт і дорівнює для легованих сталей 30-100 %/год., для вуглецевих сталей – 150-200 %/год. Після відпалу одержують структури, відповідні діаграмі стану «залізо – цементит»: для доєвтектоїдних сталей – перліт і ферит, для евтектоїдних сталей – перліт і для заєвтектоїдних сталей – перліт і вторинний цементит.

У залежності від температури нагрівання розрізняють такі види відпалу:

1) *рекристалізаційний відпал* – нагрівання і витримка сталі вище температури рекристалізації. Деталі після холодної пластичної деформації (холодного штампування, прокатування, волочіння) для зниження внутрішніх напруг, зменшення твердості і міцності, підвищення пластичності і в'язкості (зняття наклепу) піддають рекристалізаційному відпалу.

Температура рекристалізаційного відпалу не залежить від температури фазових перетворень у сталі, а залежить від температури плавлення сплаву. Наприклад, для маловуглецевих сталей температура рекристалізаційного відпалу складає 650 - 670 °C.

2) *повний відпал* – нагрівання сталі вище критичної точки  $A_{c3}$  ( $GSE$ ) на 30-50 °C, витримка при цій температурі до повного прогрівання та закінчення фазових перетворень і охолодження разом з піччю. Застосовується повний відпал для доєвтектоїдних вуглецевих і легованих сталей після гарячої обробки тиском, або дифузійного відпалу. Для легованих сталей температура нагрівання дещо вища –  $A_{c3} + (50-70\text{ °C})$ . Час витримки розраховують залежно від розмірів виробу – 2-3 хв. /мм перерізу.

Метою повного відпалу є зниження твердості, підвищення пластичності і ударної в'язкості, поліпшення оброблюваності різанням, подрібнення зерна, а також підготовка структури до остаточної термічної обробки.

Цей вид відпалу зазвичай використовують для доєвтектоїдної сталі. При повному відпалі феритно-перлітна структура переходить при нагріванні в аустенітну, а потім при охолодженні перетворюється у ферит і перліт, тобто здійснюється повна перекристалізація, крупні зерна перліту і фериту стають дрібними, усуваються напруження. Повному відпалу піддають сортовий прокат, поковки та фасонні виливки перед подальшою термічною обробкою.

Для заєвтектоїдних сталей, як правило, застосовується неповний відпал, тому що при повному відпалі (тобто при нагріванні заєвтектоїдної сталі вище лінії  $A_{cm}$  ( $SE$ ) вторинний цементит виділяється по межах зерен аустеніту, а перліт отримує грубодисперсну пластинчасту будову. Така структура має підвищену крихкість і схильна до деформації і тріщин при подальшому загартуванні.

3) *неповний відпал* – нагрівання сталі вище критичної точки  $A_{c1}$  ( $PSK$ ) на 10-30 °C, витримка і повільне охолодження з піччю. Після



неповного відпалу карбїди набувають зернистої форми, усувається цементитна сітка по границях зерен, утворюється структура зернистого перліту. Такий відпал ще називають відпалом на зернистий перліт, *сфероїдизувальним* або *сфероїдизацією*.

Сталі з зернистим перлітом мають нижчі значення твердості та міцності у порівнянні зі сталями з пластинчастим перлітом. Сфероїдизація значно покращує оброблюваність різанням, а також здатність деталей деформуватися. Її вживають як попередню обробку для доєвтектоїдних сталей, які піддають холодній пластичній деформації.

З метою повнішої сфероїдизації карбїдів використовують ще один вид відпалу – *циклічний*, або *маятниковий*, який передбачає кілька циклів нагрівання та охолодження навколо критичної точки  $A_1$  (рис. 7.1, а). Повторні цикли фазового перетворення прискорюють процес сфероїдизації та можуть сприяти подрібненню зерна.

4) *ізотермічний відпал* є різновидом повного відпалу. Він полягає в нагріванні до температури  $A_{c3}+$  (30-50 °C), витримці при цій температурі, як при повному відпалі, охолодженні нижче точки  $A_1$  (до 660-680 °C) і ізотермічній витримці при цій температурі протягом 3 - 6 годин для завершення розпаду аустеніту (рис. 7.1, б).

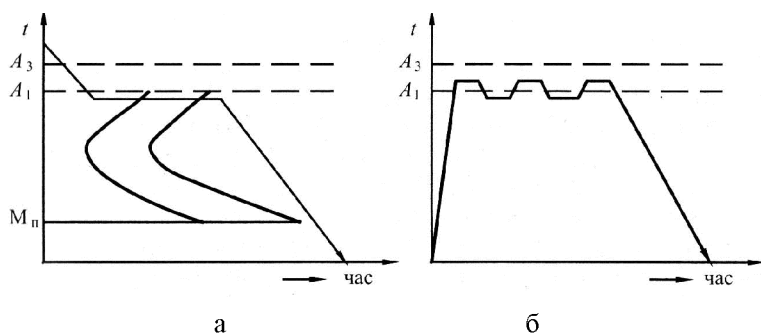


Рис. 7.1. Режими видів відпалу сталі:

а – ізотермічний; б – циклічний

Після цього вироби охолоджують на повітрі. Така обробка забезпечує отримання рівноважної феритно-перлітної або перлітної структури (залежно від марки сталі). Перевагою такого відпалу у порівнянні з повним є скорочення тривалості процесу і отримання

одноріднішої структури, оскільки розпад аустеніту відбувається при постійній температурі, а не в інтервалі температур, як при повному відпалі. Застосовують також часто при охолодженні під час неповного відпалу для додаткової сфероїдизації карбідів.

5) *дифузійний відпал* (гомогенізація) – нагрівання сталі до температур 1100-1200 °С, тривала витримка (15-20 годин) і наступне охолодження. Мета – вирівнювання хімічного складу литої структури, що має сильну дендритну ліквіацію. Застосовують дифузійний відпал для великих фасонних сталевих виливків і виливків із легованої сталі. Після дифузійного відпалу мікроструктура покращується, усувається або пом'якшується дендритна неоднорідність, але сильно росте зерно аустеніту, тому структура виходить крупнозернистою із зниженою ударною в'язкістю. Для виправлення структури (подрібнення зерна) проводять повторний повний відпал (або нормалізацію).

Для деяких спеціальних сталей і сплавів дифузійний відпал застосовують з метою вирощування зерна (для електротехнічних магнітом'яких матеріалів застосовують відпал для підвищення магнітної проникності).

У виливках, зварних з'єднаннях, виробках після обробки різанням, у яких у процесі попередніх технологічних операцій через нерівномірне охолодження, неоднорідну пластичну деформацію та ін. виникли залишкові напруження, для їх зняття проводять *низький відпал*. Його проводять при температурі 300 - 650°С, тобто він не супроводжується фазовим перетворенням (частіш за все температура низького відпалу лежить в межах 350 - 550 °С).

## 7.2 Нормалізація

*Нормалізація* – різновид відпалу, який відрізняється тим, що охолодження проводять на повітрі (трохи швидше, ніж охолодження з піччю). Це визначає деяку різницю якостей відпаленої і нормалізованої сталей.

Нормалізація – нагрівання сталі вище ліній  $A_{c3}$  -  $A_{cm}$  ( $GSE$ ) на 30 - 50 °С, витримка і наступне охолодження на повітрі. Після нормалізації вуглецеві сталі мають таку саму структуру, як і після відпалу, але дисперсність перліту підвищується. Тривалість витримки при температурі нагрівання розраховують, враховуючи розміри виробу (~ 3 хв. /мм перерізу).

Для низьковуглецевих і низьколегованих сталей різниця в структурі після відпалу і нормалізації відсутня, тому для цих сталей рекомендується нормалізація, тому що вона є більш дешевою операцією, ніж відпал (менший час зайнятості печей). Для середньота високовуглецевих сталей після нормалізації можна отримати достатньо високу твердість – 40-45 HRC. Тому, хоча в більшості випадків нормалізація використовується як попередня термічна обробка замість відпалу, для сталей з вмістом вуглецю більше 0,35 %, особливо легованих, нормалізація може бути зміцнювальною термічною обробкою.

Нормалізацію також використовують для крупногабаритних виливків, в яких мала швидкість охолодження зумовлюється великою масою виробу, внаслідок чого інші види термічної обробки неможливі. Окрім того, нормалізацію можуть застосовувати замість гартування з відпуском в тих випадках, коли деталь не дуже навантажена, що докладніше розглядатиметься у підрозділі 7.7.

### 7.3 Гартування

*Гартування* сталі – нагрівання доєвтектоїдної сталі вище лінії  $A_{c3}$  (GS), а заєвтектоїдної сталі – вище лінії  $A_{c1}$  (SK) на 30-50 °C, витримка і наступне охолодження зі швидкістю більше критичної, яка забезпечує перетворення переохолодженого аустеніту у мартенсит. Метою гартування є отримання граничної (найбільшої) твердості сталі. Повне гартування передбачає нагрівання сталі до аустенітного стану.

Головними параметрами процесу гартування є: температура нагрівання; час витримки; середовище, у якому нагрівають виріб; швидкість охолодження.

*Вибір температури нагрівання.* Температура нагрівання сталі під гартування залежить від вмісту вуглецю та вибирається згідно діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 7.2). Повне гартування застосовується тільки для доєвтектоїдної і евтектоїдної сталей. При нагріванні доєвтектоїдних сталей вище  $A_{c1}$ , але нижче  $A_{c3}$  (неповне гартування) структура сталі буде складатися з аустеніту і фериту, а після гартування – з мартенситу і фериту. Для заєвтектоїдних сталей загартування полягає у нагріванні вище лінії  $A_{c1}$  і теоретично є

неповним. Після такого гартування сталь буде мати структуру мартенситу і цементиту вторинного.

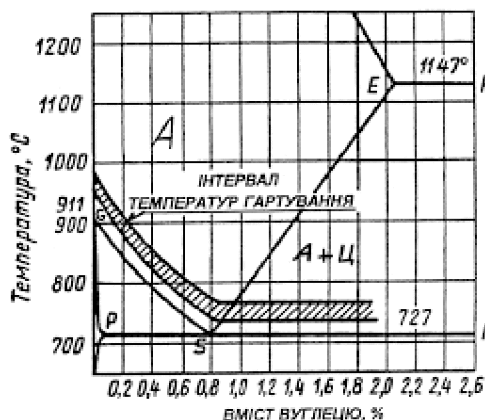


Рис. 7.2. Інтервал температур під гартування

Для заевтектоїдних сталей загартування полягає у нагріванні вище лінії  $A_{c1}$  і теоретично є неповним. Після такого гартування сталь буде мати структуру мартенситу і цементиту вторинного.

Цементит має високу твердість і, отже, не знижує твердості загартованої сталі, а навіть підвищує її зносостійкість. Нагрівання ж вище  $A_{c3}$  – не потрібне і небезпечне, тому що знижує твердість (внаслідок розчинення цементиту і підвищення кількості остаточного

аустеніту), сприяє росту зерна аустеніту, підвищує можливість виникнення великих гартівних напруг і інтенсивність зневуглецювання поверхневих шарів. Отже, дуже важливим є обмеження температури нагрівання.

Як правило, температури нагрівання повинні бути: для доевтектоїдних сталей – на 30 - 50 °C вище критичної точки  $A_{c3}$ , для заевтектоїдних – на 30 -50°C вище  $A_{c1}$ . Для легованих сталей інтервал температур – на 50-70 °C вище критичних точок.

*Нагрівальне середовище.* Найпростіший спосіб – нагрівання виробів у повітряному середовищі печі. Але такий спосіб супроводжується окисленням і зневуглецюванням поверхні виробів, що призводить до втрат металу і погіршення властивостей деталей. Тому для захисту виробів нагрівання можна здійснювати у вакуумних печах, у печах із газовим середовищем (суміші газів  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , водень, аргон і т ін.), в розплавлених солях ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ) і металах. Склад газових сумішей та соляних ванн можна знайти у відповідних довідниках.

*Тривалість витримки при нагріванні.* Тривалість нагрівання розраховують таким чином, щоб забезпечити наскрізне прогрівання

виробу, завершення фазового перетворення і перерозподіл вуглецю та легувальних елементів. Для одиначної деталі цей час залежить від її розмірів і середовища, в якому ведеться нагрівання.

Тривалість нагрівання складається з тривалості нагрівання деталі до заданої температури та тривалості витримки при цій температурі; вона визначається вимогами досягнення максимальної однорідності (гомогенізації) і мінімального розміру зерен твердого розчину, який отриманий при температурі нагріву. З таблиці 7.1 видно, що чим вище температура, тим менше повинна бути витримка для одержання однакових властивостей.

Таблиця 7.1. Вплив температури та середовища нагрівання і форми виробу на тривалість нагрівання

Середовище нагрівання	Температура, ° C	Тривалість нагрівання на 1 мм поперечного перерізу виробу, сек.		
		Круг	Квадрат	Прямокутник
Полуменева піч	800-900	40-45	55-80	80-90
Соляна ванна	800-950	12-15	15-18	18-22
	1300	6-8	8-10	10-12
Електрична піч	600	120	180	240
	700	90	132	180
	800	60	90	120
	900	48	72	96
	1000	24	36	48

Якщо нагрівання ведеться у вакуумі або газовому середовищі час вибирають за умови  $\sim 1$  хв. /мм товщини (перерізу) деталі. При нагріванні у рідкому середовищі час приймають рівним 0,2 – 0,5 хв./мм товщини деталі. Тривалість ізотермічної витримки становить 15-25 % від часу нагрівання. Якщо нагрівається велика маса металу, час витримки збільшується.

*Швидкість охолодження.* Як вже говорилося, для отримання мартенситної структури сталь необхідно охолоджувати зі швидкістю більшу за критичну. Але при виборі охолоджувального середовища слід враховувати рівень напружень, які завжди виникають при гартуванні. Питомий об'єм мартенситу більший, ніж аустеніту. Тому,

якщо мартенситне перетворення іде неодноразово в усьому об'ємі деталі, це викликає виникнення напружень.

Оскільки для легованої сталі критична швидкість охолодження значно менша, ніж для вуглецевої, леговану сталь для отримання мартенситу можна одержувати в мінеральній оливі, що знижує напруження. Вуглецеві ж сталі, які мають велику  $V_{кр}$ , необхідно охолоджувати різко, наприклад, у воді. При цьому можуть виникнути значні напруження, які призводять до короблення виробів і появи тріщин. Швидкість охолодження в різних охолоджуючих середовищах наведена в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2. Швидкість охолодження в різних охолоджуючих середовищах

Охолоджуюче середовище	Швидкість охолодження, °C/c	
	Інтервал температур, °C	
	550-650	200-300
10%- ний розчин їдкого натру у воді	1200	300
10%- ний розчин кухонної солі у воді	1100	300
Вода чиста при температурі:		
18°C	600	270
25°C	500	270
50°C	100	270
75°C	30	200
Мінеральна олива	150	30
Емульсія оливи у воді	70	200
Мильна вода	30	200
Спокійне повітря	≈ 8	
Охолодження з піччю	0,05 – 1,00	

Як видно з таблиці 7.2, гартівна дія води при підвищенні її температури різко знижується, тому велику кількість деталей потрібно гартувати в баку з проточною водою, щоб підтримувалася необхідна температура. Для зниження швидкості охолодження у воді до неї додають рідке мило, масляну емульсію або вапняне молоко. Щоб забезпечити високу швидкість охолодження і запобігти утворенню на

поверхні деталі, що охолоджується, повітряних бульбашок, деталь треба різко та безперервно переміщувати у воді або додати звичайної солі.

Слід мати на увазі, що особливо небезпечним є швидке охолодження саме в інтервалі мартенситного перетворення, коли виникають структурні напруження. Тому *ідеальним охолоджувачем* є такий, що забезпечує високу швидкість охолодження в інтервалі мінімуму стійкості аустеніту (чим усувається можливість розпаду аустеніту в структури перлітної родини) і повільне охолодження в інтервалі мартенситного перетворення (рисунк 7.3, а). Досвід свідчить, що до такого охолоджувача наближаються водні розчини солей, лугів та деяких полімерів.

Правильний вибір гартівної середовища має велике значення для успішного проведення термічної обробки. Вище температури 650 °C швидкість перетворення аустеніту мала, тому при гартуванні сталь у цьому інтервалі можна охолоджувати повільно (не доводячи, звичайно, аустеніт до розпаду). Інтервал температур щонайменшої стійкості аустеніту (650 – 400 °C) повинен бути пройдений швидко. У зоні температур мартенситного перетворення, тобто нижче 300 °C, навпаки, охолодження повинно бути сповільненим, щоби структурні напруження встигли вирівнятися, а термічні напруження були б мінімальними.

Термічні напруження залежать не тільки від зовнішніх факторів (швидкість охолодження, розміри і форма деталі та ін.), але й від якостей матеріалу деталі (пластичність та ін.). Вони викликають жолоблення, тріщини й розриви деталі.

При охолодженні поверхневі шари, що мають більш низьку температуру, ніж серцевина, зазнають напруження розтягу, а серцевина – напруження стискання. Це внутрішні напруження I роду (термічні напруження).

Внутрішні напруження II роду (структурні напруження) виникають усередині зерна, або між зернами (між окремими елементами структур).

Внутрішні напруження III роду викликаються пружними перекошуваннями кристалічної ґратки (сторонніми атомами у твердому розчині – приклад: мартенсит).

Напруження, що збереглися у деталі внаслідок охолодження, називаються залишковими. Необхідним засобом зменшення залишкових напружень є відпуск.

Для зменшення напружень також використовують спеціальні способи гартування.

#### 7.4 Способи гартування сталі

При гартуванні сталі виникають великі внутрішні напруги, які складаються з термічних і структурних (фазових) напруг. Термічні напруги залежать від швидкості охолодження, теплопровідності сталі, перепаду температур і т. ін. Чим більше вуглецю у сталі, тим більші структурні напруги. Вони викликаються збільшенням об'єму при перетворенні аустеніту у мартенсит.

Щоб одержати при гартуванні мінімальні внутрішні напруги, в залежності від складу, форми і розмірів деталі та якостей, що вимагаються від гартування, використовують різні види гартування.

На рисунку 7.3, б на С-подібні криві нанесені режими охолодження для існуючих способів гартування. Розглянемо їх з точки зору залишкових напружень.

Існуючі способи гартування позначені цифрами 1-5.

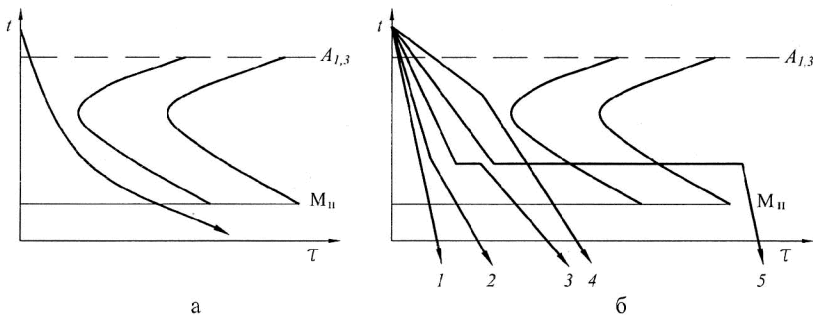


Рис. 7.3. Крива охолодження для ідеального охолоджувача (а) та схеми режимів різних способів гартування (б): 1 – неперервне; 2 – у двох середовищах; 3 – сходишкове; 4 – із підстужуванням; 5 – ізотермічне



1. *Неперервне гартування, або гартування в одному охолоджувачі* (рис. 7.3, б, режим 1). При такому гартуванні деталь занурюють в охолоджувач безпосередньо з температури нагрівання і залишають у гартівній рідині до повного охолодження. Це найпростіший спосіб і найпоширеніший в практиці. Але його недоліком є виникнення в деталях значних напружень. Застосовується для нескладних деталей з вуглецевих і легованих сталей.

2. *Гартування у двох охолоджувачах, або переривчасте гартування* (рис. 7.3, б, режим 2). Деталь спочатку охолоджують у воді до температури дещо вище точки  $M_n$ , а потім для завершення охолодження переносять в оливу. При цьому мартенситне перетворення відбувається в умовах більш повільного охолодження, що значно знижує структурні напруження, пов'язані з різницею питомих об'ємів аустеніту та мартенситу. Недоліком цього способу є складність регулювання витримки деталі у воді до її переносу в оливу. Застосовується для інструменту з високовуглецевих сталей і вимагає від терміста достатньої кваліфікації.

3. *Сходинкове (ступінчасте) гартування*. Деталь з печі переносять у ванну з температурою на 30-50 °С вище температури початку мартенситного перетворення  $M_n$  для даної сталі, витримують для вирівнювання температури по перерізу виробу, після чого охолоджують на повітрі (рис. 7.3, б, режим 3). Мартенситне перетворення відбувається при повільному охолодженні на повітрі і розвивається майже одночасно у всій деталі, тому як термічні напруження, так і ті, що спричинені різницею питомих об'ємів, практично відсутні. Недоліком цього способу гартування є обмеження розміру деталей: максимальний діаметр деталей з вуглецевих сталей становить 10 мм, з легованих – 20-30 мм (дрібні свердла, ножі, обойми підшипників).

4. *Гартування з підстуджуванням* (рис. 7.3, б, режим 4). Цей спосіб використовують для зниження термічних напружень. В такому випадку деталь перед гартуванням підстуджують (охолоджують до нижчої температури) у печі або на повітрі. Але при цьому необхідно запобігти частковому розпаду аустеніту у верхньому інтервалі температур, тобто охолоджувати так, щоб крива 4 не перетинала криву початку перетворення аустеніту вище мартенситної точки  $M_n$ . Зменшення перепаду температур між виробом і охолоджувальним середовищем приводить до зниження термічних напружень.

5. *Ізотермічне гартування.* Як і при сходи́нковому гартуванні, виріб переносять із печі у ванну з температурою дещо вище точки  $M_n$  (250-350 °C), але час витримки в цьому випадку вибирається за умови завершення розпаду аустеніту в інтервалі бейнітного перетворення. Після цього деталь охолоджують на повітрі (рис. 7.3, б, режим 5). Як середовище, в якому відбувається ізотермічна витримка при сходи́нковому та ізотермічному гартуванні, використовують розплави солей та лугів, склад яких можна знайти у відповідній літературі. Після ізотермічного гартування отримують структуру бейніту. Твердість сталі при цьому способі нижча, ніж при інших способах гартування (45-55 HRC), але пластичність і ударна в'язкість вища. Така обробка в багатьох випадках забезпечує високу конструкційну міцність виробів і широко використовується для відносно невеликих деталей (пружини, болти, шайби).

6. *Гартування з самовідпуском* полягає в тому, що деталь після нагріву до гартівної температури, занурюють у гартівне середовище не повністю, а тільки тією частиною, де потрібна висока твердість, і охолодження ведуть не до кінця. Самовідпуск буде здійснюватися за рахунок тепла тієї частини деталі, яка не була занурена у гартівне середовище. Гартування з самовідпуском застосовують для зубил, кувалд, слюсарних молотків та іншого інструменту, який поєднує високу твердість на поверхні з в'язкою серцевиною (торці стержнів клапанів, зуби молотарки, лезо і ніж лемеша, край сегменту ріжучого апарату комбайну).

## 7.5 Відпуск

Відпуск (відпускання) – заключна термічна обробка, яка полягає в нагріванні загартованої сталі до температури нижче критичної точки  $A_{c1}$ , витримці та охолодженні, як правило, на повітрі (інколи в оливі).

Мета відпуску:

- зняти частково або повністю напруження, які виникли при гартуванні;

- отримати необхідну структуру для забезпечення потрібних експлуатаційних властивостей, оскільки саме після відпуску сталь одержує свої кінцеві властивості.

Витримка при відпуску звичайно становить 1,5 – 2 год.

Залежно від необхідних експлуатаційних властивостей використовують три види відпуску.

1) *Низькотемпературний*, або *низький* – нагрівання загартованої сталі до температури 120 – 250 °С. В процесі такої обробки мартенсит гартування  $M_{\text{гарт}}$  перетворюється у структуру, яка називається *мартенсит відпуску*  $M_{\text{відп}}$ .

При утворенні  $M_{\text{відп}}$  більша кількість вуглецю залишається в  $\alpha$ -твердому розчині, але його атоми перерозподіляються в межах кристалічної ґратки, переміщуючись до дефектів (вакансій, дислокацій). Внаслідок цього гартівні напруження знижуються приблизно на третину, а твердість залишається практично незмінною. Вона може зменшитися не більше ніж на 2-4 HRC.

Гартування з низьким відпуском – це оптимальна термічна обробка для різального та вимірювального інструменту, підшипників кочення, деталей машин, які працюють в умовах тертя і зношування, та які піддавалися поверхневому зміцненню – цементації з гартуванням або поверхневому гартуванню (ці види обробки розглядатимуться далі). Прикладом таких деталей є зубчасті колеса, колінчасті та розподільні вали, штовхачі клапанів тощо.

2) *Середньотемпературний*, або *середній відпуск*. Такий відпуск виконують при температурах 350 – 500 °С. При нагріванні до цих температур вуглець починає виділятися з кристалічної ґратки мартенситу, як правило, у вигляді цементиту, вміст вуглецю в твердому розчині поступово зменшується, тобто  $M_{\text{гарт}}$  розпадається на дві фази – ферит і цементит. Така структура називається *трититом відпуску*, її особливістю є зерниста форма карбідної фази, чим він відрізняється від пластинчастих структур, що утворюються при розпаді аустеніту.

Після середнього відпуску знижуються твердість і тимчасовий опір  $\sigma_{\text{в}}$ , дещо підвищуються пластичність та ударна в'язкість, але границя текучості  $\sigma_{0,2}$  залишається на високому рівні ( $\sigma_{0,2} / \sigma_{\text{в}} \approx 0,9$ ). Отже, середній відпуск забезпечує високі пружні властивості матеріалу. При цьому гартівні напруження знижуються приблизно на дві третини.

Гартування з середнім відпуском – типова термічна обробка для ресор, пружин, торсійних валів, штампів та інших деталей, які при експлуатації зазнають великих пружних деформацій.

3) *Високотемпературний, або високий відпуск.* При високому відпуску деталі нагрівають до 500 – 700 °С. При цьому відбувається ріст цементитних частинок. Порівняно з механічною сумішшю фериту і цементиту, яка утворилася після середнього відпуску, структура стає менш дисперсною, але зберігає зернисту форму. Така структура називається *сорбітом відпуску*.

Після високого відпуску твердість падає практично до рівня, який сталь мала перед гартуванням (в нормалізованому або відпаленому стані), і значно зменшується тимчасовий опір. У той же час границя текучості хоч і знижується, але залишається на достатньо високому рівні, підвищується пластичність, значно зростає ударна в'язкість, а поріг холодноламкості знижується. Зміна властивостей при нагріванні загартованої сталі показана на рисунку 7.4.

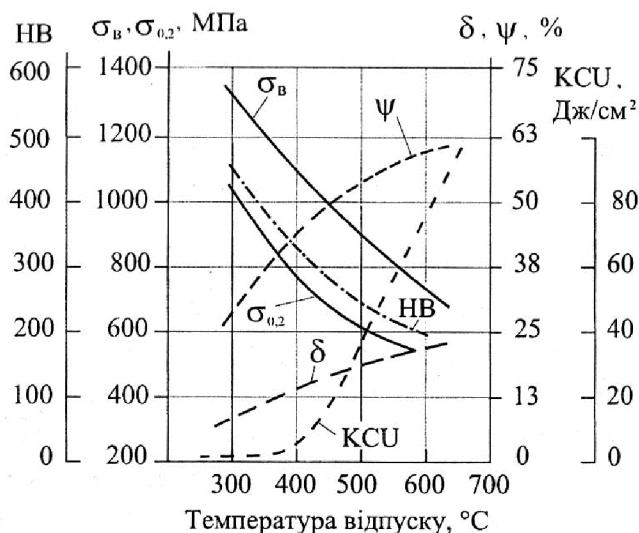


Рис. 7.4. Зміна властивостей загартованої сталі 40 залежно від температури відпуску

Залежність твердості сталі з різним вмістом вуглецю від температури відпуску – на рис. 7.5. Високий відпуск повністю знімає залишкові напруження.

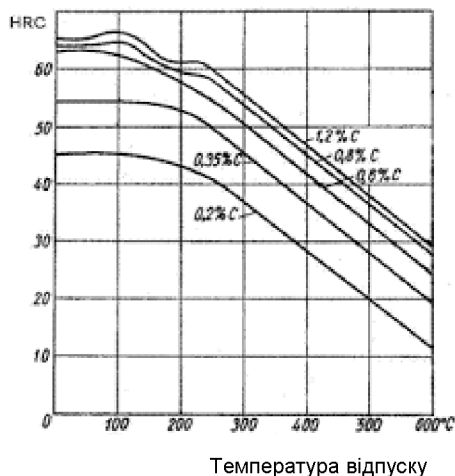


Рис. 7.5. Залежність твердості сталі з різним вмістом вуглецю від температури відпуску

Після гартування з високим відпуском досягається найкраще поєднання міцності, пластичності та ударної в'язкості. Тому таку термообробку називають *покращенням (поліпшенням)*.

Високий відпуск використовують для виробів, які в експлуатації зазнають ударних та циклічних навантажень і повинні мати високу конструкційну міцність. Це особливо важливо для важко навантажених виробів. Покращенню піддають шатуни, осі, вали тощо. Після покращення всі властивості вищі, ніж після відпалу та нормалізації.

На процеси при відпуску великою мірою впливають легувальні елементи. Перш за все вони затримують розпад мартенситу і укрупнення карбідних частинок. Тому після відпуску при однаковій температурі твердість легованих сталей за умови однакового вмісту вуглецю, як правило, вища, ніж вуглецевих. Отже, після відпуску леговані сталі при однаковому вмісті вуглецю забезпечують вищі показники міцності. З іншого боку, це дозволяє отримати в легованій сталі задану твердість при вищій, порівняно з вуглецевою, температурі відпуску і таким чином знизити залишкові напруження.

*Відпускна крихкість.* Отже, з підвищенням температури відпуску характеристики пластичності та ударна в'язкість зростають. Але в деяких випадках в легованих сталях при відпуску в певному інтервалі температур відбувається помітне зниження ударної в'язкості (окрихчення). Це так звана відпускна крихкість. Зниження ударної

в'язкості спостерігається при цьому у двох температурних інтервалах: 250-300 °С (відпускна крихкість I роду) та 500-550 °С (II роду).

Відпускна крихкість I роду притаманна і вуглецевим, і легованим сталям. Причиною цього явища є нерівномірність розподілу карбідних частинок при розпаді мартенситу: на межах зерен карбіди виділяються інтенсивніше, ніж усередині зерна, що призводить до виникнення напружень та окрихчення металу. Підвищення температури відпуску усуває відпускну крихкість I роду. Повторний відпуск при температурі 250-350 °С, проведений після нагріву до вищої температури, не приводить до зниження в'язкості. Тому цей вид крихкості називають необоротною (рис. 7.6).

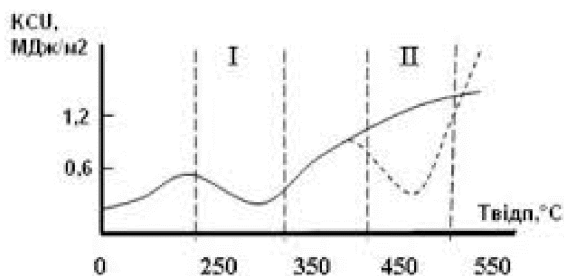


Рис. 7.6. Вплив температури відпуску на ударну в'язкість сталі:

I – зона необоротної відпускнуї крихкості;

II – зона оборотної відпускнуї крихкості

Відпускна крихкість II роду спостерігається тільки у легованих сталях та відбувається при повільному охолодженні сталей від температур 500-550 °С. Збільшення швидкості охолодження усуває цей вид крихкості, але повторне нагрівання до вказаних температур знову призводить до окрихчення, тому крихкість II роду називають зворотною. Така крихкість не тільки значно знижує ударну в'язкість, але й підвищує поріг холодноламкості. Тому це явище є дуже шкідливим і його слід уникати.

Сталі, леговані марганцем, кремнієм, хромом або сумісно леговані хромом та нікелем, є найбільш схильними до відпускнуї

крихкості II роду (особливо, якщо вони містять підвищену кількість фосфору). Схильність до оборотної крихкості помітно зменшується при введенні молібдену (0,2-0,4%) або вольфраму (0,5-0,7%).

У загальному вигляді зони нагрівання для відпалу, нормалізації та відпуску (відпусканню) наведені на рисунку 7.7.

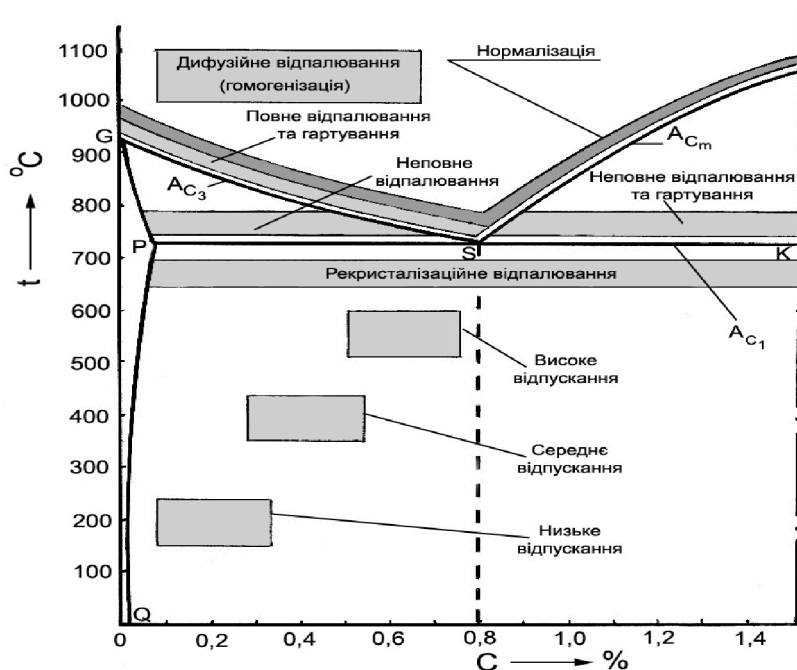


Рис. 7.7. Зони нагрівання для відпалу, нормалізації та відпускання

## 7.6 Старіння

Термін «відпуск» прийнято застосовувати тільки до тих сплавів, які були піддані гартуванню з поліморфним перетворенням, а термін «старіння» – у випадку гартування без поліморфного перетворення (після такого гартування фіксується перенасичений твердий розчин). Головним процесом при старінні є розпад перенасиченого твердого розчину, отриманого в результаті гартування.

Основна мета старіння – підвищення міцності та стабілізація властивостей. Розрізняють наступні види старіння:

1) *природне старіння* – самовільне підвищення міцності (зменшення пластичності) загартованого шару, що відбувається в процесі його витримки при кімнатній температурі;

2) *штучне старіння* – підвищення міцності, що відбувається в процесі витримки при підвищених температурах. Штучне старіння застосовується для вимірювальних інструментів (калібрів, скоб і подібних деталей точного машинобудування). Температура штучного старіння звичайно становить 150-180 °С, тривалість – 5-20 год.;

3) *деформаційне старіння* – підвищення міцності внаслідок пластичної деформації;

4) *термічне старіння* – старіння після термічної обробки.

Старіння є основним способом зміцнення алюмінієвих сплавів, деяких сплавів міді, а також багатьох жароміцних і інших сплавів. В даний час все більш широко використовують мартенситостаріючі сплави.

Якщо при старінні відбувають процеси виділення, то таке старіння називається *дисперсним твердінням*.

## 7.7 Загартовуваність та прогартовуваність сталі

*Загартовуваність* – здатність сталі підвищувати свою твердість у результаті гартування. Загартовуваність сталі характеризується твердістю мартенситу, який одержують після гартування. Оскільки твердість мартенситу залежить від кількості в ньому вуглецю, загартовуваність тим вища, чим більше в сталі вуглецю. Легувальні елементи на загартовуваність сталі практично не впливають.

Загартовуваність сталі визначають на тонких пластинках, в яких після гартування можна отримати 100 % мартенситу. Тобто загартовуваність сталі характеризує максимальну твердість, яку може отримати дана сталь після гартування.

*Прогартуваність* – здатність сталі гартуватися на певну глибину, тобто отримувати мартенситну структуру на тій чи іншій відстані від поверхні. Наскрізна прогартуваність виробів пов'язана з різною швидкістю охолодження по перерізу – вона найвища на



поверхні та значно нижча в центрі виробу. Прогартовуваність вимірюється у одиницях довжини (мм).

Загартованою зоною називається зона, що має структуру, яка складається з 95 % мартенситу і 5 % троститу.

Чим менша критична швидкість ( $V_{кр}$ ), тим більше прогартовуваність сталі. Усі фактори, які збільшують стійкість переохолодженого аустеніту (зсовують С-образну криву праворуч), внаслідок чого зменшують критичну швидкість загартування, сприяють збільшенню прогартовуваності. Вплив прогартовуваності на механічні властивості сталі показаний на рисунку 7.8.

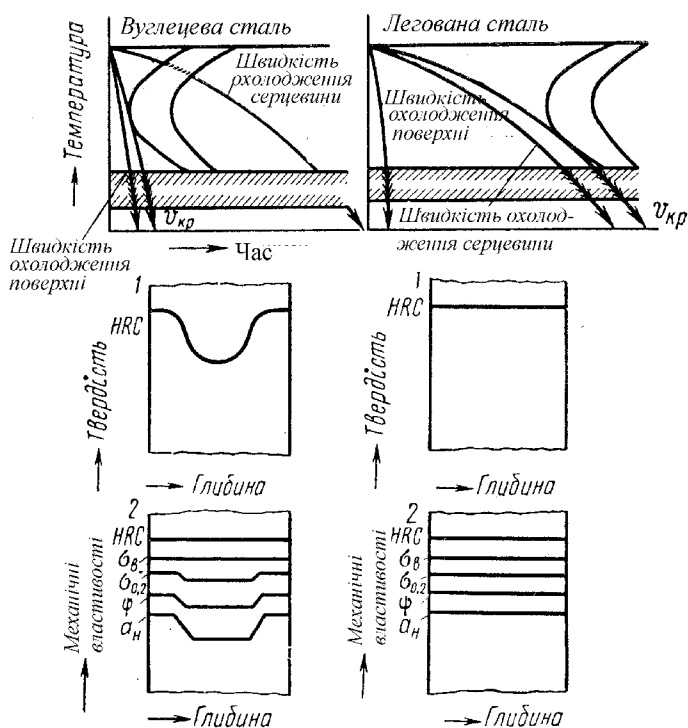


Рис. 7.8. Вплив прогартовуваності на механічні властивості сталі

Основними внутрішніми факторами, які збільшують прогартовуваність є:

- 1) легуючі елементи (крім кобальту  $C_o$ );
- 2) вміст вуглецю (до 0,8 %);
- 3) розмір зерна аустеніту (чим більше зерно, тим більша прогартовуваність).

Зовнішні фактори:

- 1) розміри деталі (чим більше розміри, тим менша прогартовуваність);
- 2) інтенсивність охолодження (чим більше охолодження, тим більше прогартовуваність).

Кількісною характеристикою прогартовуваності є *критичний діаметр* ( $D_{кр}$ ). Критичним діаметром називається найбільший діаметр зразка, який у даному охолоджувачі прогартовується наскрізь, він визначається методами пробного або торцевого гартування.

Властивості виробу після відпуску при наскрізній і не наскрізній прогартовуваності суттєво відрізняються. В такому разі важливого значення набуває глибина, на яку загартувався виріб.

При наскрізній прогартовуваності і на поверхні, і в серцевині після гартування утворюється мартенсит, який після високого відпуску по всьому перерізу перетворюється в сорбіт відпуску з карбідами зернистої форми. Якщо прогартовуваність не наскрізна, то структура зернистого типу буде отримана після відпуску тільки на поверхні. В серцевині ж при гартуванні утворюється феритно-карбідна суміш пластинчастого типу. Її називають сорбітом (троститом) гартування, щоб підкреслити утворення з аустеніту, а не з мартенситу. Ця структура не зміниться й після високого відпуску. Тобто, в цьому випадку структура неоднорідна по перерізу.

Отже, для важконавантажених виробів, до яких ставиться вимога високої конструкційної міцності, необхідно забезпечити наскрізну прогартовуваність. В цьому випадку сталь вибирають за умови, що  $D_{кр} \geq$  діаметра деталі.

Якщо ж деталь навантажена менше і властивості, що забезпечуються пластинчастими структурами є достатніми, покращення можна отримати нормалізацією.

## 7.8 Обробка сталі холодом

В сталі, яка містить більш ніж 0,6 % С, точка  $M_k$  лежить нижче кімнатної температури, і структура після гартування складається з

мартенситу та залишкового аустеніту. Аустеніт знижує твердість і зносостійкість сталі. Щоб позбавитися залишкового аустеніту, виконують *обробку холодом*, яка полягає в охолодженні загартованої сталі до температури нижче  $M_k$ . Це приводить до перетворення залишкового аустеніту в мартенсит і, як наслідок, до підвищення твердості сталі. При цьому також стабілізуються розміри виробів, що особливо важливо для плунжерних пар, калібрів тощо.

Зазвичай для обробки холодом використовують рідкий азот. Витримка загартованої сталі при нормальній температурі перед обробкою холодом протягом 3-5 годин зменшує ефект її впливу, тому рекомендується її проводити негайно після гартування.

Слід мати на увазі, що обробка холодом призводить до підвищення залишкових напружень, що може викликати утворення тріщин. Для запобігання цьому рекомендується проведення відпуску відразу після обробки холодом.

Обробці холодом піддають інструмент з високолегованих сталей та інші вироби. В яких кількість залишкового аустеніту обмежується (деталі підшипників кочення, плунжерні пари і т. ін.)

## 7.9 Термомеханічна обробка

*Термомеханічна обробка (ТМО)* полягає у поєднанні двох способів зміцнення – пластичної деформації та термічної обробки, виконаних у певній послідовності. Суть ТМО полягає в тому, що під впливом пластичної деформації структура аустеніту зазнає змін (подрібнюється зерно, підвищується густина дислокацій, зміцнюється їх розподіл), які в певній мірі передаються мартенситу. Внаслідок цього сталь зміцнюється як за рахунок мартенситного перетворення, так і завдяки специфічній будові деформованого аустеніту, що успадковується мартенситом. Виходячи з описаного процесу, цю обробку точніше було б називати *термодеформаційною* (ТДО).

Залежно від температури деформування і порядку проведення операцій пластичної деформації та термічної обробки розрізняють кілька варіантів ТМО. Основні з них – *високотемпературна, низькотемпературна і попередня термомеханічна обробка*.

*Високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО)* полягає в здійсненні деформації аустеніту в області його стабільного існування – вище температури  $A_3$  (рис. 7.9, а, деформація позначена

зигзагоподібною лінією). Ступінь деформації дорівнює 20-30 %. Після деформації негайно проводять гартування, щоб запобігти розвитку рекристалізаційних процесів (допускається лише стадія первинної рекристалізації, що сприяє утворенню ультра дрібного зерна). Після гартування, як правило, виконують низький відпуск.

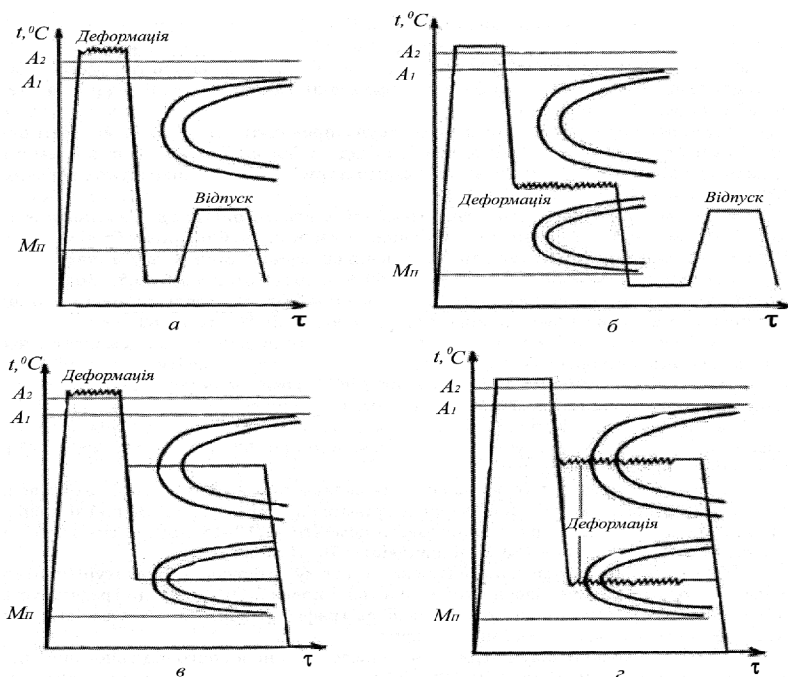


Рис. 7.9. Класифікаційна схема ТМО:  
 а – ВТМО; б – НТМО; в – високотемпературний  
 ізоформінг; з – низькотемпературний ізоформінг

Підвищення властивостей сталі після ВТМО відбувається внаслідок того, що мартенситне перетворення відбувається в сталі з певною субструктурою внаслідок деформації. Це дає можливість, наприклад, на сталі, яка містить 0,5 % C; 1 % Cr; 4 % Ni; 0,5 % Mo, після нагрівання до 1050-1100 °С, деформації на 25-30 % при температурі 900-950 °С гартування та низького відпуску досягати  $\sigma_s = 2600 - 2700$  МПа;  $\delta = 8 - 10$  %;  $KCU = 56$  Дж/см<sup>2</sup>.

Низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО) передбачає деформацію сталі в зоні переохолодженого аустеніту при температурах 350-400 °С (рис. 7.9, б), охолодження з цієї температури (гартування) і низький відпуск. Температура деформації має бути вище точки  $M_n$ , але нижче температури рекристалізації  $t_p$ . При цій обробці призначають великі ступені деформації (75-90 %). Іноді таку обробку за режимом НТМО називають *аусформінгом*.

*Ізоформінг* – це термомеханічна обробка, за якої сталь нагрівають вище точки  $A_3$ , охолоджують до температури максимуму на кривій ізотермічного розпаду аустеніту (рис. 7.9, в, г) та деформують не тільки перед початком розпаду, але й під час усього процесу перетворення метастабільного аустеніту на перліт.

Деформація аустеніту при ТМО не тільки підвищує в ньому загальну густину дислокацій, але, що саме головне, формує упорядковану стійку дислокаційну субструктуру, яка має вигляд комірок, розмежованих дислокаційними стінками. Важливу роль у стабілізації структури, яка формується при деформації аустеніту, відіграє взаємодія дислокацій з атомами вуглецю. Внаслідок цього рухомість дислокацій зменшується, що сприяє закріпленню дислокаційних конфігурацій. Мартенсит успадковує дислокаційну будову деформованого аустеніту. Таким чином, високий комплекс властивостей після ТМО зумовлюється як подрібненням зерна, так і утворенням розвинутої субструктури комірчастого типу. Крім того, взаємодія дислокацій з атомами вуглецю підвищує концентрацію останніх на дислокаційних субграницях при її зниженні в середині субзерен, що приводить до зменшення концентрації вуглецю в мартенситі, а це забезпечує підвищення пластичності і в'язкості.

ТМО впливає і на процес розпаду мартенситу при відпуску – значно збільшується дисперсність карбідів порівняно з відпуском після звичайного гартування, що також позитивно відзначається на властивостях сталі. ТМО підвищує опір втомі сталі, а також позитивно впливає на в'язкість руйнування.

На практиці більш поширеною є ВТМО. Вона ефективна як для конструкційних, так і для інструментальних сталей після різних способів деформування (прокатування, кування, штампування тощо).

Різновидом ТМО є *попередня термомеханічна обробка* (ПТМО), яка полягає у попередній холодній деформації з наступною термічною обробкою. Холодна деформація викликає підвищення

густини дислокацій і зміцнення металу. Потім деформований метал нагрівають до температур 300-400 °С для закріплення утвореної субструктури домішковими атомами. Внаслідок такої обробки досягається високий ступінь зміцнення при збереженні задовільного рівня пластичності та в'язкості.

Одним з різновидів ТМО є *контрольоване прокатування*, яке останнім часом широко використовується для низьколегованих сталей. При такій обробці жорстко регламентується режим деформування (ступінь деформації, температура її початку і особливо кінця) і умови охолодження. У результаті такої обробки в сталі одночасно підвищуються пластичність, в'язкість та знижується поріг холодноламкості. Найповніше переваги контрольованого прокатування реалізуються в сталях з карбонітридним зміцненням, які забезпечують після такої обробки високий рівень властивостей без додаткової термічної обробки.

### **7.10 Дефекти, які виникають при термообробці, методи боротьби з ними**

Відхилення від оптимальних режимів термічної обробки можуть привести до різних дефектів. Найбільш поширеними після гартування є знеуглецьовування та окислення поверхні, знижена чи нерівномірна твердість, велике зерно та підвищена крихкість, виникнення тріщин та короблення. Для захисту від окислення та знеуглецьовування використовують захисні атмосфери або нагрівання у вакуумі. У тому разі, якщо нагрівання здійснюють у повітрі, вона повинна мати більші припуски на подальшу механічну обробку для видалення знеуглецьованих та окислених шарів.

Причинами зниженої та нерівномірної твердості (виникнення так званих м'яких плям) після гартування можуть бути: недогрів (недостатня температура у печі); скорочена витримка при правильному виборі температури нагрівання (у виробі в такому разі не встигають відбутися процеси розчинення карбідів та гомогенізації аустеніту); недостатня інтенсивність охолодження. В цих випадках після гартування поряд з мартенситом присутні структурні складові з недостатньою твердістю. Такий брак можна виправити, застосувавши повторне гартування.

Занижена твердість після відпуску зазвичай є наслідком нагрівання загартованої сталі до більш високих температур. Для ліквідації цього виду браку також роблять повторну термічну обробку (гартування та відпуск) із дотриманням належних режимів.

Підвищена твердість після відпуску свідчить про недостатню температуру відпуску. Цей дефект можна усунути нагріванням до вищої температури без повторного гартування.

Підвищена крихкість є наслідком перегрівання у процесі гартування, оскільки при цьому зростає зерно аустеніту. Це призводить до зменшення ударної в'язкості (окрихчення). Для усунення цього виду браку необхідно подрібнити зерно, що здійснюють шляхом повторного нагрівання сталі в аустенітну область. Як правило, в такому разі спочатку виконують нормалізацію для отримання дрібного зерна та рівноважної структури, а потім гартують з дотриманням необхідних режимів. Нагадуємо, що при дуже високих температурах може мати місце перепал, який виправити не можна.

Як уже говорилося, гартування завжди супроводжується виникненням напружень, які зростають із зростанням температури нагрівання та швидкості охолодження в мартенситному інтервалі. Якщо метал достатньо пластичний, зменшення цих напружень відбувається шляхом пластичної деформації, наслідком чого є короблення (жолоблення). Такий вид браку часто виникає при нерівномірному та дуже високотемпературному нагріванні у процесі гартування, при неправильному розташуванні деталі в охолоджувальному середовищі. Наприклад, деталі з великим відношенням довжини до перерізу слід занурювати в охолоджувальне середовище вертикально; для запобігання короблення плоских деталей з великим відношенням діаметра до товщини (шестірні, диски і т. ін.) застосовують гартування у штампах, пресах, спеціальних пристроях.

У малопластичному ж металі при гартуванні можуть утворюватися тріщини. Схильність до появи тріщин зростатиме зі збільшенням кількості вуглецю в сталі, з підвищенням температури під гартування та швидкості охолодження. Небезпека утворення тріщин підвищується у виробках, які мають конструктивні концентратори напружень (отвори, шлиці і т.п.). Тріщини є не виправним дефектом. Самим ефективним способом зменшення напружень та запобігання тріщин є повільне охолодження в інтервалі мартенситного перетворення (про способи вже було розглянуто в п. 7.4).

## ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке відпал, нормалізація?
2. Що є спільним для видів термічної обробки: відпал, нормалізація, гартування, чим вони відрізняються між собою?
3. Які бувають види відпалу, для чого вони використовуються?
4. Які температури нагрівання при повному та неповному відпалі?
5. Яка структура формується при нормалізації?
6. В якому випадку нормалізація може бути використана замість гартування?
7. Що таке гартування?
8. Які основні способи гартування?
9. Які структури одержують при ізотермічному гартуванні сталі?
10. Які структури одержують при бездифузійному перетворенні аустеніту?
11. Що називається критичною швидкістю охолодження при гартуванні?
12. Які механічні властивості має мартенсит?
13. Як впливає нагрівальне середовище на стан поверхні виробу та його властивості?
14. Як вибирають час витримки при заданій температурі нагріву від нагрівального середовища?
15. Наведіть способи гартування сталей.
16. Які бувають різновиди відпуску? Які структури відпущених сталей?
17. Поясніть поняття відпускнуої крихкості першого та другого роду.
18. Які є види старіння? Що є основною метою старіння?
19. Що таке загартовуваність сталі? Як її визначають та від чого вона залежить?
20. Що називається прогартовуваністю сталей, яким показником її характеризують?
21. Які фактори впливають на прогартовуваність?
22. Що таке критичний діаметр?
23. В чому полягає обробка сталі холодом та для чого її роблять?
24. Яка обробка називається термомеханічною?
25. Які існують види термомеханічної обробки, їх переваги?
26. Для яких сталей найбільш раціональним є застосування контрольованого прокатування?



## РОЗДІЛ 8

### ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

У багатьох випадках від поверхневих і внутрішніх шарів виробів вимагаються різні властивості. Так, деталі, що працюють в умовах тертя, повинні мати високу твердість на поверхні і значно меншу всередині, щоб забезпечити необхідну пластичність та в'язкість виробу; високий опір руйнуванню при прикладанні циклічних та динамічних перевантажень і запобігти утворенню тріщин.

Поверхневого зміцнення потребують шийки колінчастих валів, шестірні, осі, поршневі, шарові та кривошипні пальці, торці штовхачів клапанів, черв'яки, валики, кулачки розподільних валів двигунів, шліцьові з'єднання і т. ін.

Для отримання різних властивостей на поверхні та в серцевині існують способи поверхневого зміцнення деталей, які можна поділити на три групи:

- поверхнева термічна обробка без зміни хімічного складу матеріалу (до неї належать різні способи поверхневого гартування);
- термічна обробка зі зміною складу поверхневих шарів (методи хіміко-термічної обробки);
- поверхнева пластична деформація (ППД) – метод, який використовується як заключна операція для готового виробу після того чи іншого способу зміцнення.

Поверхнева термічна обробка є найпоширенішою. В загальному обсязі термічної обробки деталей покращення займає ~ 25%. А для решти виробів застосовують поверхнєве зміцнення, при цьому перевага надається поверхневому гартуванню.

#### 8.1 Поверхнєве гартування

Принцип поверхневого гартування полягає в тому, що вище критичної точки  $A_{c3}$  розігрівається не весь виріб, як при об'ємному гартуванні, а тільки поверхня. Це створює різкий градієнт температур по перерізу деталі.

Оскільки при поверхневому гартуванні прогрівання виробу не потрібне, витримка після нагрівання практично відсутня, температура

не встигає вирівнятися по перерізу, і серцевина залишається практично холодною. В результаті на поверхні буде одержана висока твердість внаслідок утворення мартенситу. В серцевині ж структура при такому нагріванні не змінюється, і твердість та інші властивості залишаються на вихідному рівні. Для поверхневого гартування використовують сталі з концентрацією вуглецю більше 0,3 %, оскільки в сталях з меншим вмістом вуглецю після гартування твердість буде невисокою.

Залежно від способу нагрівання розрізняють різні види поверхневого гартування: з індукційним (високочастотним) нагріванням, з газополуменевим нагріванням, з нагріванням у розплавах металів, солей та в електролітах. Останнім часом набули поширення методи нагрівання лазерним випромінюванням або плазмою.

**Гартування з індукційним нагріванням.** У промисловості індукційне нагрівання струмом високої частоти є найпоширенішим. Для нагрівання деталей розміщують в індукторі (рисунок 8.1).

*Індуктор* – це соленоїд у вигляді шини або пустотілої мідної

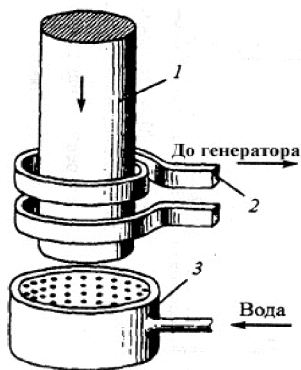


Рис. 8.1. Нагрівання циліндричної деталі СВЧ в індукторі: 1 – деталь; 2 – індуктор, який охолоджується водою; 3 - спрейер

трубки, що охолоджується водою. Через індуктор пропускають змінний струм високої частоти, який утворює змінне магнітне поле. Внаслідок явища індукції у поверхневому шарі деталі виникають вихрові струми, які приводять до виділення джоулевої теплоти та нагрівання деталі. Розподіл змінного струму по перерізу деталі нерівномірний. Густина струму на поверхні значно більша, ніж у середині виробу (так званий поверхневий ефект). У поверхневому шарі виділяється близько 90 % теплоти, тому тільки поверхневий шар нагрівається до температур вище точки  $A_{с3}$ .

Кількість тепла, що утворюється на поверхні виробу, визначається формулою:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

де  $I$  – сила струму, А;

$R$  – електроопір провідника, Ом;

$\tau$  – тривалість нагрівання, секунд.

Після нагрівання в індукторі деталь швидко переміщується в спеціальний пристрій (*спрейер*), де охолоджується водою, яка подається крізь внутрішні отвори, тобто на нагріту поверхню деталі розбризкується гартувальна рідина, найчастіше вода, або виріб скидається в гартівну ванну.

Струм високої частоти для індукційного нагрівання металу одержують від спеціального машинного генератора (частота від 500 до 5000, і навіть до 10 000 Гц) або від лампового генератора (ЛПГ) з частотою до 1000000 Гц.

Глибина нагрівання поверхневого шару при постійних інших показниках (питома потужність, час нагрівання, температура поверхні) залежить від частоти струму:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

де  $f$  – частота струму, Гц;

$\delta$  – глибина проникнення струму, мм;

$\rho$  – питомий електроопір металу, який нагрівають, Ом · см;

$\mu$  – магнітна проникність, Гс/Е.

З рівняння видно, що чим більша частота ( $f$ ), тим менша глибина проникнення струму ( $\delta$ ), а отже, менша товщина загартованого шару. Якщо необхідно одержати глибину загартованого шару до 2 мм, слід використовувати лампові генератори, якщо більшу – машинні.

Температура нагрівання поверхні при індукційному гартуванні дорівнює 980-1050 °С, тобто дещо вища, ніж в разі об'ємного гартування. Це пов'язано з тим, що через високу швидкість нагрівання (500 °С/с порівняно з ~ 30 °С/с при нагріванні в печах) утруднюється розчинення карбідів і гомогенізація аустеніту, тому виріб дещо перегрівають. Але це не призводить до укрупнення зерна аустеніту, оскільки час перебування виробу при високих температурах дуже малий.

Тривалість нагрівання деталі СВЧ залежить від форми та розміру поперечного перерізу заготовки. Так, тривалість нагрівання для круга становить 0,5-0,8; квадрату – 0,6-0,9; прямокутника 0,6-1,0 с/мм поперечного перерізу. Зміна твердості по перерізу заготовки після гартування СВЧ наведена на рисунку 8.2.

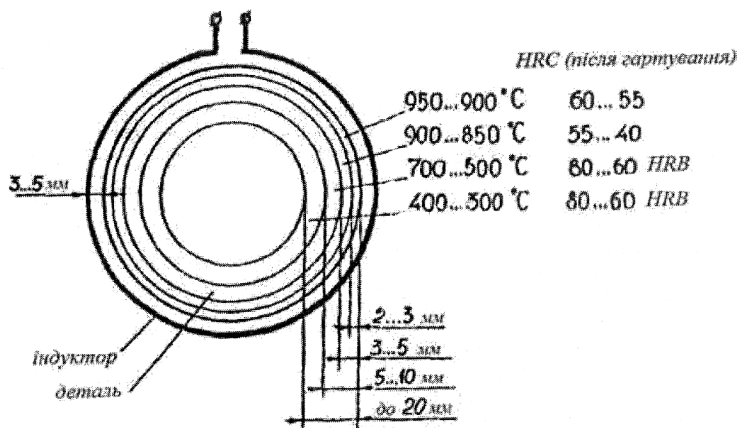


Рис. 8.2. Розподіл твердості по перерізу заготовки після гартування СВЧ

Найчастіше для поверхневого гартування використовують середньовуглецеві сталі з концентрацією вуглецю 0,40-0,45 % (40,45,40X, 40XH, 40XC та ін.), хоча можуть використовуватися і сталі з більшою кількістю вуглецю (~ 0,6 %).

Гартування СВЧ застосовується як для сталевих, так і для чавунних виробів (колінчасті та розподільні вали, гільзи циліндрів тощо). Така обробка покращує властивості виробів:

- практично не відбувається короблення деталей, окиснення поверхні і вигорання вуглецю та інших елементів;

- утворюється дрібне зерно аустеніту, а отже, і мартенситу, що сприяє підвищенню  $\sigma_b$  до 1200-1300 МПа при збереженні досить високих показників пластичності ( $\delta \sim 20$  %);

- значно (на 40-50 %) підвищується опір втомному руйнуванню завдяки виникненню у поверхневому шарі залишкових напружень стискання.

Технологічними перевагами методу є: значно менші витрати електроенергії, оскільки нагрівається тільки поверхневий шар; висока продуктивність; точне й легке регулювання глибини загартованого шару, можливість автоматизації процесу; здійснення гартування безпосередньо у потоковій лінії механічної обробки без переривання технологічного циклу виробництва; поліпшення умов праці робітників.

Однак слід мати на увазі високу вартість обладнання для поверхневого гартування. Тому застосування цього методу рентабельне лише в умовах масового та серійного виробництва.

**Гартування з газополуменевим нагріванням.** При такому гартуванні поверхню деталі нагрівають ацетиленокисневим полум'ям за допомогою пальника (температура полум'я до  $3100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Пальник переміщують вздовж деталі, поверхня якої нагрівається значно вище  $A_{c3}$ , а серцевина не встигає нагрітися. Охолодження нагрітої поверхні здійснюється водою, що подається через водопровідну трубку, яка з'єднана з пальником і переміщується слідом за ним (рисунок 8.3).

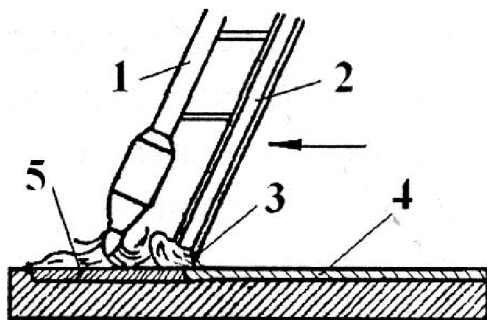


Рис. 8.3. Схема поверхневого гартування при газополуменевому нагріванні:

- 1 – пальник; 2 – водопровідна трубка; 3 – вода; 4 – загартований шар;  
5 – нагрітий шар

Пальник розташовують на відстані 3 – 6 мм від поверхні деталі, та він переміщується зі швидкістю 50-200 мм/хв. Нагрівання триває ~ 5 - 20 с. За цей час деталь прогрівається на глибину від 4 до 10 мм. Після охолодження у поверхневому шарі утворюється мартенситна структура з твердістю 52 - 56 HRC (для сталі з 0,45 - 0,5% С).

Таке гартування – простий і дешевий процес, який легко автоматизувати і включити у загальний потік механічної обробки. Однак він має суттєві недоліки: можливе значне перегрівання поверхні, що погіршує властивості виробу; недостатньо рівномірне нагрівання поверхні через коливання температури полум'я; неоднорідність структури загартованого шару. Такий спосіб гартування застосовується для великих деталей, особливо якщо вони мають плоску поверхню.

*Поверхнєве гартування з нагріванням лазером.* Лазери – це генератори світла. Лазерне випромінювання розповсюджується вузьким пучком і має дуже високу концентрацію енергії. Використання лазерів для термічної обробки засноване на перетворенні енергії світла в теплову енергію.

Лазерне гартування здійснюється шляхом дуже швидкого короткочасного ( $10^{-3} - 10^{-7}$ с) нагрівання поверхні деталі концентрованим потоком енергії лазерного пучка до високих температур і швидкого охолодження завдяки інтенсивному відведенню теплоти в глибину, тобто, відбувається самогартування. Швидкість охолодження досягає  $10^3 - 10^5$  °C/с, що запобігає відпуску мартенситу в процесі охолодження та забезпечує отримання вищої твердості, ніж після звичайного гартування.

Глибина загартованого поверхневого шару регулюється потужністю лазерного випромінювання, а також часом взаємодії пучка з поверхнею деталі та може змінюватися від 0,1 до 2 мм.

Таке поверхнєве гартування – високопродуктивний метод, який легко піддається автоматизації. Така швидкісна термічна обробка забезпечує дуже дрібне зерно аустеніту при нагріванні, дисперсний мартенсит і дрібні частинки при охолодженні, що обумовлює високий рівень експлуатаційних властивостей. Зносостійкість при цьому підвищується в 2-4 рази, границя витривалості – на 70-80 %, границя контактної витривалості – на 50-60 %, порівняно з гартуванням СВЧ. Крім того, лазерне гартування дозволяє уникнути короблення та деформації виробів.

Суттєвою перевагою цього процесу є можливість гартування окремих ділянок поверхні виробів, внутрішніх поверхонь будь-якої форми, оскільки лазерний промінь може бути направлений в необхідне місце через систему дзеркал.

Лазерну поверхневу обробку використовують для поверхневого зміцнення як сталевих, так і чавунних деталей машин (розподільні та колінчасті вали, гільзи циліндрів, різьбові деталі тощо), а також інструменту (різці, свердла, фрези, розгортки і т. ін.).

## 8.2 Об'ємно-поверхневе гартування

Об'ємно-поверхневе гартування полягає в тому, що виріб піддають індукційному нагріванню до температур вище  $A_{сз}$  на глибину значно більшу, ніж необхідна товщина загартованого шару. В цьому випадку глибина гартування зумовлюється не глибиною прогрівання виробу, а прогартовуваністю сталі. Після гартування на поверхні утворюється структура мартенситу з високою твердістю (до 60 HRC), а в серцевині, оскільки тут швидкість охолодження менша за критичну, – сорбіт або тростит із твердістю 30-40 HRC. Але завдяки дрібному зерну, яке утворюється при індукційному нагріванні, властивості виробу значно покращуються.

Для глибинного нагрівання використовують спеціально розроблені сталі *зниженої* або *регламентованої* прогартовуваності. Це досягається обмеженням в сталі кількості таких постійних домішок, як *Mn*, *Si*, а також подрібненням зерна аустеніту (використанням спадково дрібнозернистих сталей), оскільки при дрібному зерні прогартовуваність знижується.

Сталі *зниженої* прогартовуваності позначаються літерами ПП («пониженная прокаливаемость»), регламентованої – РП. Загальний вміст постійних домішок елементів в сталях ПП не перебільшує 0,5 %. Прикладом сталі такого типу є 55ПП. Глибина загартованого шару для неї дорівнює 2-4 мм.

У сталях РП вміст марганцю вищий (до 0,9 - 1,2 %). Для подрібнення зерна додають *Ti* (0,06 - 0,12 %), що знижує прогартовуваність. Прикладом сталі такого типу є сталь 47ГТ. У таких сталях отримують глибину загартованого шару 7-8 мм.

## 8.3 Хіміко-термічна обробка

Сутність процесу хіміко-термічної обробки (ХТО) полягає у насиченні поверхневих шарів виробу одним або відразу кількома елементами у поєднанні з певною термічною обробкою, яка залежно

від виду ХТО може виконуватися до і після насичення поверхні. Отже, при ХТО структура та властивості поверхні деталі зумовлюються як зміною хімічного складу поверхні, так і термічною обробкою.

*Мета ХТО* – одержати тверду і зносостійку поверхню деталі при збереженні досить пластичної та в'язкої серцевини.

Залежно від елемента, яким насичується поверхня виробу, розрізняють такі види ХТО: *цементация* – насичення вуглецем; *азотування* – насичення азотом; *нітроцементация (ціанування)* – одночасне насичення вуглецем та азотом; *борування* – насичення бором; *силіціювання* – насичення кремнієм; *дифузійна металізація* – насичення хромом, алюмінієм тощо.

Незалежно від конкретного виду ХТО при цій обробці одночасно відбуваються три фізико-хімічні процеси:

- *дисоціація* – розпад молекул насичуючого середовища з одержанням необхідного елемента в активному атомарному (іонізованому) стані;

- *адсорбція* – поглинання поверхнею атомів (іонів) насичувального елемента, тобто утворення хімічного зв'язку між цими іонами та поверхнею;

- *дифузія* – переміщення насичувального елемента в глибину металу (виробу). При цьому утворюється дифузійний шар, концентрація елементів в якому відрізняється від вихідної.

**Цементация сталі.** Для цементації використовують маловуглецеві (0,15 - 0,30 %С) нелеговані та леговані сталі марок 15,20, 25, 15Х, 20Х, 20ХН, 12ХН3А, 18ХГТ, 20ХНМ, 20ХГР та ін. Крупногабаритні деталі відповідального призначення виготовляють з легованих сталей з підвищеним вмістом вуглецю (0,25 - 0,30 % С) – 25ХГМ, 30ХГТ, 30ХГНМ та ін.

Температура цементації має бути вище  $A_{с3}$ , щоб забезпечити перехід сталі в аустенітний стан, оскільки в аустеніті може розчинитися значна кількість вуглецю.

Як правило, процес цементації здійснюється при 930 - 950 °С. Така температура забезпечує і утворення аустеніту, і достатньо інтенсивне проходження дифузії, швидкість якої звичайно зростає з підвищенням температури. З підвищенням температури зростають зерна аустеніту, що погіршує в'язкість сталі. З метою прискорення процесу цементації іноді підвищують температуру нагрівання до



1000-1100 °С, але такий режим можна використовувати тільки для спадково дрібнозернистих сталей.

*Технологія процесу цементації.* На цементацію деталі надходять після механічної обробки з припуском на шліфування (50-100 мкм). Перед цією обробкою вироби необхідно знежирити, вони мають бути чистими та сухими. Місця, які не підлягають цементації, обміднують гальванічним способом або покривають спеціальною пастою на основі рідкого скла.

Цементация може відбуватися у твердому та газовому середовищах (карбюризаторах), які є постачальником атомарного вуглецю. Залежно від цього розрізняють два види цементації – *в твердому карбюризаторі та газову.*

Для цементації в твердому карбюризаторі деталі після очищення пакують у металевий контейнер і пересипають карбюризатором – сумішшю деревного подрібненого вугілля та вуглекислих солей натрію й барію, які є активізаторами процесу. Контейнер герметично закривають і завантажують у піч. При нагріванні в умовах нестачі кисню у контейнері утворюється атомарний вуглець. Після закінчення процесу контейнер вивантажують із печі, охолоджують на повітрі, розпаковують.

Швидкість насичення поверхні деталі вуглецем при такому виді цементації ~ 0,1 мм/год. Тривале перебування при високих температурах призводить до росту зерна аустеніту, подрібнення якого здійснюється при наступній термічній обробці.

Головними недоліками цементації у твердому карбюризаторі є велика тривалість процесу через повільне прогрівання ящика з деталями та мало теплопровідним карбюризатором та забруднення приміщення пилом від вугілля. Це трудомісткий та малопродуктивний процес, який зараз має обмежене застосування та використовується, в основному, для одиничних деталей та в дрібносерійному виробництві.

Більш поширеним способом є газова цементация, яка здійснюється у середовищі газів, що містять вуглець – природний газ, суміш пропану і бутану, спеціальні ендотермічні атмосфери.

Найкращий за якістю цементований шар створюється при використанні природного газу, головним компонентом якого є метан. У серійному виробництві газову цементацию проводять в шахтних муфельних печах серії Ц (Ц-35Б, Ц-60Б, Ц-75Б, Ц-105Б). У спеціальних робочих камерах при високій температурі (930-950 °С)

метан розкладається на водень і вуглець в атомарному стані, який і дифундує в поверхню деталі, розчинюючись в аустеніті. Швидкість насичення поверхні вуглецем становить  $\sim 0,15$  мм/год.

До переваг газової цементації порівняно з твердою слід віднести: скорочення тривалості процесу, можливість його повної автоматизації та механізації. Відсутність пилу, зручність контролю та регулювання товщини цементованого шару і вмісту вуглецю, можливість подальшої термічної обробки безпосередньо з цементаційного нагрівання, висока економічність та продуктивність процесу.

*Склад і структура цементованого шару.* Властивості поверхні деталі зумовлюються вмістом вуглецю та структурою цементованого шару. Найкращі властивості досягаються при концентрації вуглецю у поверхневому шарі в межах 0,9 -1 %. Структура поверхні деталі, яка містить 0,9 -1 % С, складається з перліту та невеликої кількості цементиту – це заевтектоїдна зона. Далі йде шар з концентрацією вуглецю 0,8 % - евтектоїдна зона з перлітною структурою, а за нею – доевтектоїдна зона з перлітно-феритною структурою, в якій вуглецю менше 0,8 %. Ця зона плавно переходить у структуру серцевини з вмістом вуглецю 0,15-0,3 % залежно від марки сталі (рис. 8.4).



заевтектоїдна зона | евтектоїдна зона | доевтектоїдна зона | серцевина

Рис. 8.4. Структура цементованого шару

Глибину цементації оцінюють за *ефективною товщиною цементованого шару*, за яку приймають сумарну глибину заевтектоїдної, евтектоїдної та частини доевтектоїдної зони до глибини, де кількість перліту дорівнює  $\sim 40$  %. Необхідна глибина цементації визначається умовами експлуатації деталі та найчастіше

знаходиться у межах 1,2 - 1,5 мм. Як показує досвід, для деталей, які виготовлені зі сталей з вмістом вуглецю  $< 0,17\%$ , глибина має складати 15 % від мінімальної товщини (діаметра) деталі; з вмістом більше 0,17% – п'ять-дев'ять відсотків; для деталей, що працюють на знос без значних питомих навантажень – три-чотири відсотки від товщини деталі. У випадках, коли виріб працює в умовах значних контактних навантажень та повинен мати високу контактну витривалість, глибина цементації може сягати до 2 – 2,5 мм. Цементовані вироби піддають подальшій термічній обробці.

*Термічна обробка після цементації.* Висока твердість і зносостійкість поверхні в поєднанні з в'язкою і достатньо пластичною серцевиною досягаються внаслідок термічної обробки – гартування і низького відпуску. Існують різні режими термічної обробки після цементації.

Гартування можна виконувати безпосередньо з цементаційної печі після підстужування до температури 840-860 °С для зменшення термічних напружень (режим I, рис. 8.5). Це найекономічніший режим, але він застосовується лише для спадково дрібнозернистих сталей (легованих  $Ti$ ,  $Mo$ ,  $V$ ,  $Zr$ ). Для інших сталей потрібне повторне нагрівання під гартування для подрібнення зерна (режим II). Найчастіше деталі нагрівають до температури  $A_{c1} + 70-80$  °С, яка забезпечує подрібнення зерна в цементованому шарі.

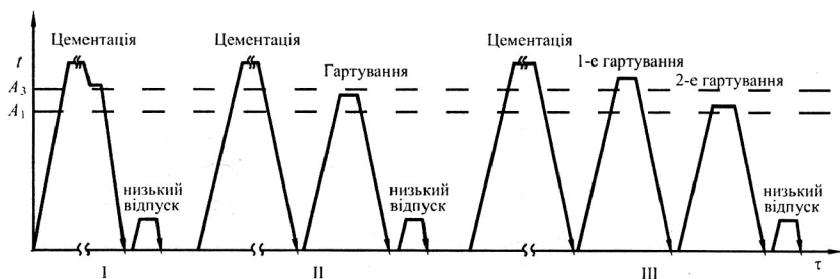


Рис. 8.5. Режими термічної обробки цементованих виробів

Важконавантажені деталі повинні мати дрібне зерно як на поверхні, так і всередині для отримання високої міцності та ударної в'язкості. В таких випадках використовують режим III, де перше гартування проводять при температурах вище  $A_{c3}$  для повного

виправлення серцевини, друге – при температурах вище  $A_{c1}$  (760-780 °C) для одержання необхідних властивостей у поверхневому шарі.

Після цементації та гартування проводять низький відпуск (160-180 °C) для зменшення гартівних напружень без помітного зниження твердості. Така термічна обробка забезпечує одержання на поверхні деталі структури мартенситу відпуску (59-62HRC), яка гарантує високу зносостійкість. Серцевина ж деталі залишається маловуглецевою, тому навіть у легованих сталях, які мають високу прогартуваність, після гартування в серцевині утворюється маловуглецевий мартенсит, у якого є достатній запас в'язкості та пластичності, щоб чинити опір крихкому руйнуванню.

Цементації піддають шестірні, черв'яки, пальці, осі, вали, штовхачі клапанів, тобто деталі, які, виходячи з умов експлуатації, повинні мати зносостійку робочу поверхню, високу границю контактної витривалості, у тому числі при згинанні та скручуванні. В'язка серцевина таких деталей без руйнування сприймає ударні та циклічні навантаження.

**Азотування.** Це – хіміко-термічна обробка, яка полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару сталі азотом. Мета азотування – одержання високої твердості та зносостійкості поверхні при збереженні в'язкості та корозійної стійкості виробу. Такі властивості азотований шар отримує безпосередньо після азотування, яке здійснюється при температурі 500-570 °C, без наступної термічної обробки. Розміри деталі після азотування мало змінюються, тому азотуванню піддають готові вироби після термічної та механічної обробки. Після азотування застосовують тільки заключне шліфування та доводку виробів.

**Технологія азотування.** Заготовки деталей перед азотуванням піддають покращенню (гартування з високим відпуском). Відпуск проводять при температурі 600 - 675 °C (вище температури азотування), що забезпечує добру оброблюваність різанням. Структура сталі після такого відпуску – сорбіт відпуску.

Технологічний процес виготовлення азотованої деталі складається з наступних операцій: виготовлення заготовки; покращення; механічна обробка, що може включати шліфування; захист ділянок, які не підлягають азотуванню, нанесенням тонкого шару олова або рідкого скла; азотування; кінцеве шліфування або полірування.

Процеси, що відбуваються при азотуванні. Азотування здійснюють у спеціальних герметичних камерах, в які подають аміак. При температурі процесу аміак розкладається з утворенням атомарного азоту, який поглинається поверхнею виробу і поступово її насичує.

Оскільки азотування ведеться при температурах нижче  $A_{c1}$ , фазове перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення не відбувається. Необхідна твердість досягається за рахунок двох процесів:

- розчинення азоту у фериті (отримання азотистого фериту);
- утворення дисперсних нітридів (хімічних сполук атомів металу з азотом).

Згідно діаграми стану Fe-N, розчинність азоту в залізі невелика й становить 0,1% при 590 °С. При температурі нижче 590 °С формується  $\alpha$ -фаза, тобто розчин азоту в  $\alpha$ -залізі; при температурі вище 590 °С формується  $\gamma$ -фаза, тобто розчин азоту в  $\gamma$ -залізі, максимальна розчинність якого складає 2,8 % (рис. 8.6).

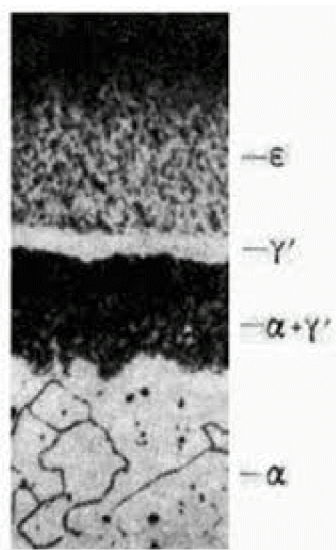


Рис. 8.6. Будова шару заліза, азотованого при  $T > 590^\circ\text{C}$

Підвищення вмісту азоту в поверхневому шарі призводить до утворення  $\gamma'$ - фази, тобто твердого розчину азоту на базі сполуки  $\text{Fe}_4\text{N}$ , з вмістом азоту від 5,7 до 6,7 % . При подальшому збільшенні азоту формується  $\varepsilon$ -фаза (твердий розчин азоту на базі сполуки  $\text{Fe}_2\text{N}$ , який містить від 4,6 до 11% азоту).

Тобто, зі зниженням температури розчинність азоту у фериті зменшується, після охолодження до кімнатної температури в ньому виділяються надлишкові фази – нітриди ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ ), які зміцнюють азотистий ферит.

Оскільки твердість азотованого шару на залізі та нелегованих сталях невелика (300-350HV), для одержання високої твердості використовують сталі,

леговані такими елементами як алюміній, хром, молібден, ванадій. Ці елементи утворюють тверді розчини обмеженої розчинності. При охолодженні від температури азотування з цих розчинів виділяються дуже дисперсні тверді надлишкові нітриди  $AlN$ ,  $CrN$ ,  $MoN$ ,  $VN$ , які підвищують твердість азотистого фериту та утруднюють рух дислокацій, забезпечуючи підвищення міцності. Більшість легувальних елементів збільшують розчинність азоту у фериті, що в свою чергу сприяє зростанню твердості. У результаті досягається висока твердість (1100-1200 HV), зносостійкість та корозійна стійкість поверхонь сталевих деталей.

Швидкість азотування становить  $\sim 0,01$  мм/год., тобто процес дуже тривалий, що є головним його недоліком. Прискорити процес азотування можна підвищенням температури, але при цьому знижується твердість. Тому зазвичай температура азотування не перевищує 510-540 °C. Концентрація азоту в шарі має бути не більше 3-4 %, щоб запобігти окрихченню сталі.

*Сталі, що піддають азотуванню.* Вибір конкретної марки сталі залежить від вимог до виробу. Якщо основною вимогою до азотованого шару є високі значення твердості та зносостійкості, то застосовують спеціальні сталі, леговані  $Al$ ,  $Cr$ ,  $Mo$  – так звані *нітралої* (35ХМЮА, 38ХМЮА, 38Х2МЮА), при цьому твердість азотованого шару підвищується до 1000-1200HV. Але слід відзначити, що азотований шар сталей з алюмінієм має підвищену крихкість. Тому ці сталі не забезпечують надійної експлуатації виробів в умовах значних контактних та ударних навантажень. У таких випадках використовують сталі без алюмінію, леговані  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $V$ , хоча твердість таких сталей нижча (700-900 HV). Для азотування також широко використовують сталі 18ХГТ, 30ХГТ, в яких після покращення серцевина виробів має високу міцність у поєднанні з високими значеннями пластичності та ударної в'язкості.

Азотуванню піддають також інструментальні сталі, що підвищує стійкість інструменту в 1,5-2 рази, а також вироби з чавунів. Для азотування чавунів використовують переважно сірі чавуни з хромом, нікелем, молібденом та іншими нітридоутворюючими елементами, а також високоміцний чавун. Перед азотуванням сірі чавуни відпалюють при 950-1000 °C протягом 4-12 годин, далі гартують (800-850 °C) у оливі з короткочасним відпуском при 600 °C. Азотування чавунів роблять при нагріванні виробів до 550-580 °C,

витримці від 50 до 70 годин та охолодженні разом із піччю. При цьому відбувається підвищення твердості до 600-1000 НВ, зносостійкості та корозійної стійкості в газовому середовищі.

Як і при цементації, глибину азотованого шару оцінюють ефективною товщиною, за яку приймають відстань від поверхні до шару з твердістю 500-550 НВ.

Азотуванню піддають гільзи циліндрів та клапани двигунів внутрішнього згоряння, деталі насосів, втулки, матриці та пуансони штампів, шпинделі верстатів, прес-форми, колінчасті та розподільні вали (сталеві та чавунні). Азотування дуже широко використовують для точних деталей паливної апаратури (голки форсунок, розпилювачі, плунжери).

**Нітроцементация.** Цей процес являє собою насичення поверхні виробу одночасно азотом і вуглецем у газовому середовищі. Нітроцементация є різновидом ціанування, яке відбувається в розплавлених солях, що містять групу CN, при температурах 500-600 °C (*низькотемпературне ціанування*), 820-860 °C (*середньотемпературне ціанування*) та 920-960 °C (*високотемпературне ціанування*). Але ціанування – дорогий і екологічно дуже шкідливий процес, оскільки солі, що використовуються, містять отруту – ціаністий калій або ціаністий натрій. Тому рідке ціанування сьогодні в промисловості практично не використовується.

На відміну від ціанування, нітроцементация не потребує використання шкідливих солей, значно дешевша, і тому такий спосіб поверхневого зміцнення є найпоширенішим.

Процес здійснюється у суміші газів, що містять вуглець і аміак (80-90 %  $\text{CH}_4$  та 10-20%  $\text{NH}_3$ ) при температурі 840-860 °C. З підвищенням температури насичення вуглецем збільшується, а азотом – зменшується. При вказаній температурі поверхневий шар містить ~ 1% C і 0,5 % N, швидкість процесу становить 0,15 мм/год. Твердість поверхні після нітроцементации дещо вища, ніж після цементации. Це дозволяє знизити необхідну товщину насиченого шару до 0,6-1 мм. Слід зауважити, що при глибині шару більше 1 мм знижується опір втомі.

Для зміцнення поверхні після нітроцементации деталі піддають гартуванню та низькому відпуску (160-180 °C). Після такої обробки нітроцементований шар має структуру дрібногочастого мартенситу та дисперсних карбонітридів.

Нітроцементация має значні переваги порівняно з цементациєю: нижча температура, що зменшує деформацію та короблення деталей при гартуванні; уповільнення росту аустенітного зерна завдяки нижчій температурі процесу, що дозволяє проводити гартування безпосередньо від температури нітроцементациї; вищі зносостійкість, втомна міцність та корозійна стійкість.

Для нітроцементациї використовують ті ж самі сталі, що і для цементациї (20, 20Х, 18ХГТ, 20ХГМ, 20ХГТ, 20ХГНР, 20Х2Н3А, 30ХГТ). Цей процес вживають також для виробів з середньовуглецевих сталей (40, 40Х, 40ХН), для яких потрібна висока контактна міцність.

Як правило, нітроцементацию застосовують для деталей складної конфігурації, схильних до короблення: шестерні та вали коробок передач, зубчасті колеса мостів, деталі кермового управління автомобілів і тракторів. Так, на ВАЗі нітроцементациї піддають 94,5 % деталей, що зміцнюються методами ХТО.

**Силіціювання** – це насичення поверхні виробу кремнієм. Найчастіше силіціювання здійснюється у газовому середовищі, яке містить хлорид кремнію ( $SiCl_4$ ), при температурі 950-1050 °С. Насичення кремнієм відбувається досить швидко: за 0,5-1 год. формується шар глибиною 0,2-0,4 мм. Насичений шар – це твердий розчин кремнію в  $\alpha$ -залізі, він має невелику твердість (200-300 НВ), але вельми значну пористість, що сприяє утриманню мастильного матеріалу на поверхнях тертя. Тому після просочування оливою при температурі 170-200 °С силіційований шар має високу зносостійкість.

Силіціювання збільшує корозійну стійкість у солоній воді, сірчаній, соляній і азотній кислотах, а також підвищує жаростійкість сталей до 850 °С. Цей метод використовують для деталей хімічного та нафтопромислового обладнання.

Силіціювання у твердих або газових середовищах застосовують також для підвищення твердості поверхні та стійкості у кислотах виробів з ковкого і сірого чавунів. Для отримання шару завтовшки 0,5-0,8 мм, на виливках з ковкого чавуну. Потрібна тривалість насичення від 20 до 25 годин ( $T = 1000-1100$  °С). За цей же час на виливках з сірого чавуну утворюється шар завтовшки 0,1 мм. Тобто, найкращі результати при силіціюванні одержують на виливках з ковких чавунів, задовільні – на сірих.



**Борування**, тобто насичення поверхні виробу бором, здійснюється електролітичним методом в розплавленій бурі ( $Na_2B_4O$ ) при 930-950 °С (катодом є виріб) або в газовому середовищі, що містить бор, при 850-900 °С. В результаті на поверхні утворюється шар боридів з дуже високою твердістю (1800-2000 HV). Товщина шару: 0,1-0,2 мм, час витримки: 2-6 год. залежно від температури процесу.

Борований шар має високу зносостійкість, корозійну стійкість, жаростійкість та теплостійкість. Недоліком методу є висока крихкість поверхні. Метод застосовують для деталей прес-форм лиття під тиском, в нафтопромисловій галузі тощо.

**Дифузійна металізація** – це насичення поверхневих шарів деталі металами. Процес може здійснюватися у твердих, рідких і газових середовищах.

При твердій металізації метали затором є феросплав або оксид потрібного металу з добавкою хлоридів натрію, барію і т. ін., що активізують процес. Рідка металізація відбувається занурюванням сталевих деталей у розчин металізатора, що містить необхідний для насичення поверхні елемент. Газову металізацію здійснюють найчастіше у хлоридах потрібних металів.

Найбільш поширеними методами дифузійної металізації є *алітування* (насичення алюмінієм) та *хромування* (насичення хромом).

**Алітування.** Зазвичай використовують тверде алітування у порошковій суміші, що містить фероалюміній (50-70%), оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ ) і нашатир ( $NH_4Cl$ ). Деталі завантажують у контейнер і засипають порошком. Щільно закриті контейнери нагрівають до 950-1000 °С, витримують у печі протягом 3-16 годин залежно від потрібної глибини алітованого шару (від 0,3 до 1 мм). Твердість насиченого алюмінієм шару ( $Al \sim 30\%$ ) відносно невисока ( $\sim 500$  HV), тому такий метод не забезпечує значного підвищення зносостійкості. Але при алітуванні на поверхні деталі утворюється щільна захисна плівка оксиду алюмінію, яка захищає метал від окиснення до температури 900 °С. Тому ця обробка використовується з метою підвищення корозійної стійкості деталей, що працюють при високих температурах (випускні клапани двигунів, деталі газорозподільника, камер згоряння, клапанні гнізда, чохла термопар, вихлопні труби, глушники, деталі турбін, газопроводів, колекторів та ін.).

Алітування чавуну використовують для підвищення жаростійкості. Найбільш поширене алітування чавуну в порошкових сумішах фероалюмінію при повільному нагріванні до 950-1050 °С, витримки протягом 2-6 год. та охолодженні з пічкою або на повітрі.

Недоліком алітування є крихкість шару, збагаченого алюмінієм.

*Хромування* здійснюють у суміші порошку ферохрому (60-70%) і глинозему з додаванням соляної кислоти (5%) або нашатию. Процес відбувається при 1050-1150 °С; витримка протягом 5-6 годин забезпечує шар глибиною 0,1-0,2 мм.

При хромуванні заліза і низьковуглецевої сталі (менше 25% С) насичений хромом шар має структуру пересиченого твердого розчину хрому в альфа-залізі з твердістю 200-250 НV. Призначення хромування таких сплавів – підвищення корозійної стійкості.

Хромування середньо- і високовуглецевих сталей призводить до утворення карбідів хрому, які мають дуже високу твердість азотованої і цементованої та загартованої поверхні. Для цих сталей після такої обробки підвищується як зносостійкість, так і корозійна стійкість в повітряній атмосфері, розчинах солей, морській воді, у сірчаних та вуглекислих газах до 800 °С.

Хромуванню піддають деталі, що працюють в агресивному середовищі: паросилове обладнання, газорозподільники, клапани, патрубки, вентилі тощо. Чавун хромують у твердому або газовому середовищах протягом, відповідно, 10-12 та 5-6 год., що забезпечує підвищення твердості поверхні, жаростійкості та корозійної стійкості чавунів.

Недоліком хромованого шару є його підвищена крихкість.

## **8.4 Зміцнення поверхні пластичним деформуванням**

Відомо, що пластична деформація при навантаженнях у межах від границі текучості до міцності, призводить до підвищення міцності, тобто *наклепу*. Водночас знижується пластичність та в'язкість (рис. 8.7). Наклеп іноді називають *нагартовкою*, механічним або деформаційним зміцненням.

Зміцнення при наклепі пояснюється істотним підвищенням щільності вакансій і дислокацій, дробленням зерен і блоків. Щільність дислокацій після холодної деформації збільшується на кілька порядків

порівняно з відпаленим металом. Одночасно в результаті пластичної деформації істотно змінюється мікроструктура (рис. 8.8) та фізико-хімічні властивості металу.

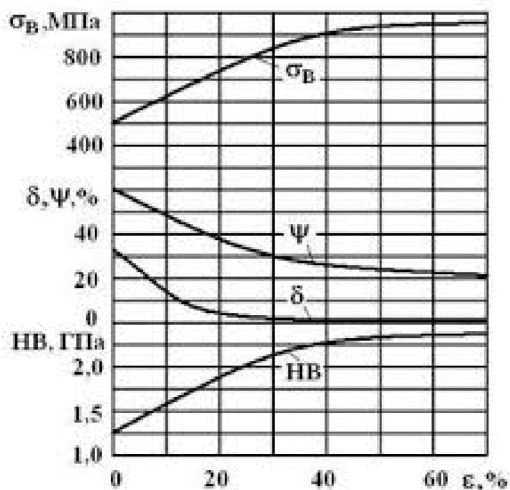


Рис. 8.7. Вплив ступеня пластичного деформування  $\epsilon$  на механічні властивості сталі:  
 $HV$  – твердість;  $\delta$ ,  $\psi$  – відносне видовження та звуження;  
 $\sigma_B$  – межа міцності

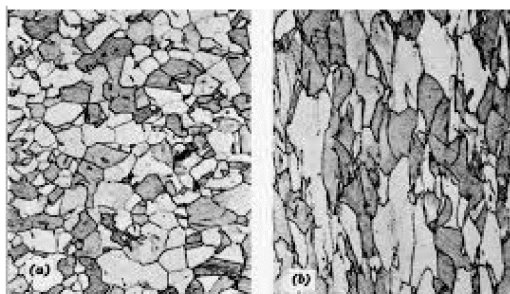


Рис. 8.8. Вплив пластичної деформації на структуру металу,  $\times 170$   
 $a$  – до деформації;  $b$  – після деформації

Зміцнення поверхні можна досягти за рахунок поверхневої пластичної деформації (ППД), яка здійснюється дробоструменевою обробкою поверхні (обдування виробу сталевим або чавунним дробом) або обкочуванням роликami.

Дробоструменева обробка відбувається у дробометах, в яких на поверхню виробу з високою швидкістю спрямовують потік дробу діаметром 0,5-1,5 мм. Обкочування роликami здійснюють за допомогою спеціальних пристроїв на звичайних токарних верстатах, де замість різця встановлюють загартований сталевий ролик.

При такій дії на виріб деформується тільки поверхневий шар на глибину від 0,5 до декількох мм, залежно від методу обробки і тиску на поверхню. Зрозуміло, що при цьому підвищується твердість поверхневого шару, але вона залишається значно меншою, ніж після поверхневого гартування та ХТО. Важливим є те, що ППД зменшує шорсткість поверхні, згладжує дрібні поверхневі дефекти, які є концентраторами напружень, і створює у поверхневому шарі напруження стиску. Все це позитивно впливає на опір втомі, тому ППД – один з ефективних способів підвищення границі витривалості.

В останні роки ППД застосовують для багатьох виробів як завершальну операцію. Дробоструменевій обробці піддають ресори, пружини, зубчасті колеса, ланки гусениць, гільзи та ін. Обкатування роликami використовують для обробки шийок валів, осей залізничного транспорту, колінчастих валів та ін. Після такої обробки границя витривалості підвищується у 1,5 рази та в декілька разів зростає довговічність виробів.

### **Питання для самоконтролю**

1. Які є способи поверхневого зміцнення виробів, у яких випадках вони використовуються?
2. Які сталі піддають поверхневому гартуванню та якими методами його здійснюють?
3. Наведіть переваги та недоліки гартування струмами високої частоти.
4. В чому полягає гартування газополуменевим нагріванням та в яких випадках його використовують?
5. Що таке об'ємне поверхнєве гартування? З якою метою його використовують?

6. Які сталі належать до сталей зниженої та регламентованої прогартуваності? Наведіть приклади таких сталей.

7. Як здійснюється поверхнєве гартування з лазерним нагріванням?

8. Назвіть основні методи ХТО.

9. Що таке цементація та як вона здійснюється?

10. Які сталі використовують для виробів, що цементують? Яка термічна обробка цементованих сталей?

11. Що таке азотування, як воно здійснюється?

12. Які сталі піддають азотуванню?

13. Які сталі піддають нітроцементації та як вона здійснюється?

14. Порівняйте процеси цементації, азотування та нітроцементації. Як ці процеси ХТО впливають на властивості виробів? В чому переваги та недоліки цих процесів?

15. Для яких виробів звичайно застосовується силіціювання та борування?

16. У чому полягає суть процесів силіціювання та борування? Які недоліки цих процесів?

17. Опишіть процес дифузійної металізації.

18. Де використовують дифузійну металізацію?

19. Як виконують поверхнєву пластичну деформацію та з якою метою?

## РОЗДІЛ 9

### ЛЕГОВАНІ СТАЛІ

#### 9.1 Класифікація легованих сталей

*Легованою* називається сталь, яка містить в собі крім заліза, вуглецю та постійних домішок, легуючі елементи, що змінюють її механічні, фізичні та хімічні властивості. Марганець вважається легуючим елементом лише при вмісті його у сталі понад 1 %, а кремній – понад 0,8 %.

Основною метою легування сталі є підвищення її міцності. Легування підвищує твердість, перешкоджає її зниженню при нагріванні та підвищує червоностійкість (збереження високої твердості при підвищених температурах), підвищує опір зносу і корозії й може створювати у сталі особливі фізичні і хімічні властивості.

Леговані сталі класифікують за такими ознаками: хімічним складом, якістю, структурою після відпалу чи нормалізації та за призначенням.

*За хімічним складом* леговані сталі поділяються на: *низько-леговані*, в яких сума всіх легувальних елементів не перевищує 2,5%; *середньолеговані* (від 2,5 % до 10 %); *високолеговані* (понад 10 %).

*За якістю* вони поділяються на якісні, високоякісні та особливо високоякісні.

*За структурою* після повільного охолодження вони поділяються на: *феритні, перлітні, аустенітні, мартенситні, ледебуритні та будівельні*.

*За призначенням* леговані сталі поділяються на: *конструкційні*, які підрозділяються на *машинобудівні та будівельні; інструментальні*, які використовують для інструментів різного призначення (різального, вимірального, штампувального); *спеціальні*, тобто сталі з особливими властивостями (зносостійкі, корозійностійкі, жаростійкі, жароміцні, сталі з певними магнітними, електричними властивостями тощо).

Легувальні елементи впливають як на сам вид діаграми стану, так і на процеси структуроутворення при термічній обробці, властивості окремих фаз, а отже, і на властивості сталей.

## 9.2 Маркування легованих сталей та сплавів

Для позначення легованої сталі застосовують певний склад цифр і літер.

За Державним стандартом для позначення легуючих елементів узяті такі літери: Х – хром, Н – нікель, Г – марганець, С – кремній, В – вольфрам, М – молібден, Ф – ванадій, К – кобальт, Т – титан, Ю – алюміній, Д – мідь, П – фосфор, Р – бор, Б – ніобій, А – азот, Е – селен, Ц – цирконій, Ч – рідкісноземельні метали (лантан та ін.).

*Конструкційну леговану сталь* маркують таким чином: перші дві або три цифри показують вміст вуглецю у сотих відсотка, літери – наявність відповідних легуючих елементів. Цифри, що стоять за літерами, показують процентний вміст цих елементів у сталі. Якщо після якоїсь літери не має цифр, то це означає, що сталь містить даний елемент у кількості до 1 %. Наприклад, марка 40Х означає хромисту сталь, що містить 0,40 % вуглецю і до 1 % хрому, марка 110Г13Л означає марганцеву сталь, що містить 1,10 % вуглецю і 13 % марганцю. Літера Л в кінці марки означає, що ця сталь ливарна, бо деталі з цієї сталі одержують литтям. Якщо сталь високоякісна, то в кінці марки сталі додають літеру А (наприклад, 30ХГСА). Якщо при маркуванні сталі літера А стоїть всередині марки, то це вказує на те, що сталь легована азотом. Треба пам'ятати, що коли літера А стоїть на початку марки сталі (наприклад, А20), це значить, що сталь автоматна. Деталі з цієї вуглецевої сталі виготовляють на верстатах – автоматах і щоб полегшити зняття стружки і одержати гладку поверхню при обточуванні на верстаті, допускається підвищений вміст фосфору (до 0,15 %) і сірки (до 0,20 %).

*Інструментальну леговану сталь* маркують таким чином: кількість вуглецю зазначається однією цифрою, що показує вміст вуглецю в десятих відсотка (наприклад, 9ХС). Якщо першої цифри немає, то це означає, що сталь містить вуглецю близько 1 % (наприклад, ХВГ). Далі порядок маркування за легуючими елементами такий, як і для легованої конструкційної сталі.

Деякі сталі спеціального призначення мають особливе маркування з літер, що ставляться спереду: А – автоматна, Ш – шарикопідшипникова, Р – швидкорізальна, Е – магнітна, Э – електротехнічна сталь.

*Нестандартні сталі* маркують літерами ЕИ і ЕП та номерами. Це означає, що сталь виплавлена на заводі “Електросталь” (літера Е), дослідна (літера И), або пробна (літера П). Номер означає черговий номер запису марки сталі у заводському журналі (наприклад, сталь ЕП276, або ЕИ269).

*Шарикопідшипникові сталі* маркують великою літерою Ш, за якою вказують легуючий елемент – хром. Цифра, або цифри за літерою Х означають вміст хрому в десятих, а не в цілих відсотках. Це виняток з правила і це треба пам’ятати (наприклад, ШХ6, ШХ15: цифри 6 та 15 – це 0,6 % та 1,5 % хрому відповідно).

*Сталі з особливими властивостями.* Багато машин мають деталі, до яких ставляться особливі вимоги щодо фізичних та хімічних властивостей: опір корозії і дії хімічних агресивних середовищ – нержавіюча сталь (наприклад, 30Х13), жароміцність (наприклад, 45Х14Н14В2М), жаростійкість (наприклад, 40Х9С2), зносостійкість (наприклад, Г13), особливі магнітні властивості (наприклад, ЕХ3), особливі теплові властивості (наприклад, Н36).

*Швидкорізальну сталь* маркують літерою Р, за якою йде цифра, чи цифри, які вказують на вміст основного легуючого елемента – вольфраму у цілих відсотках. Далі порядок маркування за легуючими елементами такий, як і для легованих конструкційних сталей (наприклад: Р6, Р9, Р12, Р18, Р6М3, Р18К5Ф2).

*Тверді інструментальні сплави.* Твердими інструментальними сплавами називають металокерамічні тверді сплави, основною складовою частиною яких є карбіди вольфраму, титану та танталу. Як зв’язувальний матеріал використовують кобальт. Ці сплави застосовують у вигляді пластинок до різального інструменту.

Тверді інструментальні сплави поділяють на 3 групи: 1) карбідо-вольфрамові (ВК2, ВК3, ВК6, ВК8); 2) карбідо-титанові (Т5К10, Т14К8, Т15К6, Т30К4); 3) карбідо-титано-танталові (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9).

Маркують тверді інструментальні сплави таким чином: ВК2 – 2 % кобальту, решта (98 %) – карбід вольфраму; Т5К10 – 10 % кобальту, 5 % карбідів титану, решта (85 %) – карбід вольфраму; ТТ7К12 – 12 % кобальту, 7 % карбідів титану і танталу (разом), решта (81 %) – карбід вольфраму.



### 9.3 Теорія легування

#### *Вплив легувальних елементів на критичні точки та вид діаграми стану. Структурні класи сталей*

Легувальні елементи не тільки впливають на температури критичних точок, але при значній їх кількості можуть суттєво змінити і сам вид діаграми стану.

Критичні точки  $A_1$  і  $A_3$  під впливом легування можуть підвищуватися або знижуватися. Такі елементи як  $Si$ ,  $W$ ,  $Ti$ ,  $Al$ ,  $Co$ ,  $V$  підвищують обидві точки,  $Mn$  і  $Ni$  знижують,  $Cr$  та  $Mo$  підвищують  $A_{c1}$  та знижують  $A_{c3}$ .

Зі схематичних діаграм стану залізо-легувальний елемент видно, що зниження критичних точок при легуванні марганцем та нікелем приводить до того, що при певній їх кількості аустеніт може стати стабільною структурою при кімнатній температурі (рисунок 9.1, а). Такі сплави називають аустенітними. Хром і кремній, навпаки, стабілізують  $\alpha$ -фазу, внаслідок чого при певній кількості цих елементів феритна структура може існувати аж до початку плавлення сталі (рисунок 9.1, б).

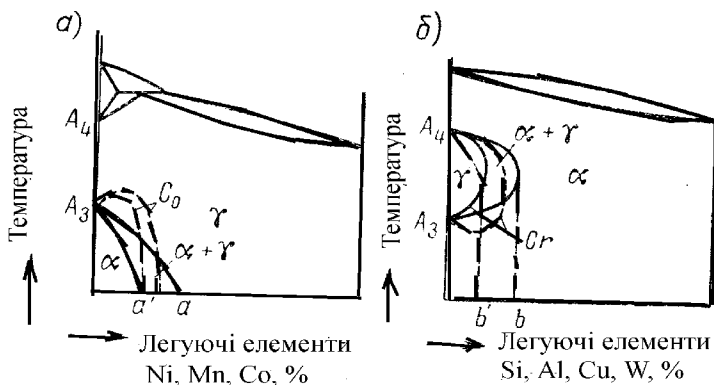


Рис. 9.1. Схематичні діаграми стану  
«залізо – легуючий елемент»

- а) легуючі елементи, які розширюють  $\gamma$ -область;
- б) легуючі елементи, які розширюють  $\alpha$ -область

Легувальні елементи також впливають на положення точок  $S$  та  $E$  діаграми стану  $Fe-Fe_3C$ . Більшість елементів ( $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Mn$ ,  $Si$ ,  $W$ ,  $Co$ ) зсувають точку  $S$  вліво.

Один відсоток елемента зміщує цю точку приблизно на 0,1% по вуглецю. Тому легована сталь може мати чисто перлітну структуру при вмісті вуглецю менше 0,8 %.

Точка  $E$  також зміщується вліво, тобто легувальні елементи зменшують граничну розчинність вуглецю у  $Fe_\gamma$ . Внаслідок цього у високолегованих багатовуглецевих сталей може з'явитися ледебурит.

Враховуючи вплив легувальних елементів на критичні точки і вид діаграми стану, леговані сталі поділяють на 5 основних структурних класів залежно від структури, яка формується при повільному охолодженні сталей з високих температур у повітрі: феритний, перлітний, аустенітний, мартенситний, ледебуритний, або карбідний.

До *феритного* класу належать мало вуглецеві (0,08-0,15 %C) високохромісті сталі ( $Cr > 12$  %), бо хром стабілізує ферит аж до температури плавлення. В ці сталі може додаватися в невеликій кількості (~ 0,1%) титан. Приклади марок сталей: 08X13, 12X17, 15X25T.

До *перлітного* належать низько- та середньолеговані сталі, які після охолодження у повітрі мають феритно-перлітну структуру з різною кількістю перліту залежно від вмісту вуглецю та легувальних елементів. Це 40X, 38XC, 15XMФ, 20X, 60C2 та ін., тобто більшість звичайних конструкційних сталей. До цього класу також відносять вуглецеві (нелеговані) конструкційні сталі.

До сталей *мартенситного* класу належать високолеговані хромісті сталі з вмістом вуглецю більше 0,3 %. Це сталі типу 30X13, 40X13, 60X13, 95X13 та ін. До мартенситних сталей також відносять хромокремнієві сталі (так звані *сильхроми*): 40X9C2, 40X10C2M та ін. Завдяки великій кількості легувальних елементів у цих сталях швидкість охолодження на повітрі перевищує критичну, внаслідок чого формується мартенсит.

*Аустенітні* – це високовуглецеві сталі, леговані значною кількістю марганцю (типу 110Г13Л), а також комплексно леговані хромонікелеві маловуглецеві (03X18H11, 12X18H9 12X18H10T та ін.) та середньовуглецеві сталі (40X14H14B2M, 60X22H8Г2АМБФ та ін.).

В цих сталях через зниження критичних точок аустенітна область на діаграмі стану простягається до кімнатних температур і нижче.

До *ледебуритного* класу належать сталі з великим вмістом вуглецю (більше 0,8 %), в яких внаслідок легування при кристалізації з рідкої фази виділяється ледебурит (точка *E* зміщена вліво). Це такі сталі як P18, P9, P6M5, P6M5K5 та ін.

Ми перелічили основні класи легованих сталей, але залежно від легування існують перехідні класи: феритно-мартенситний, аустенітно-мартенситний та ін. В сталях таких класів при охолодженні утворюються обидві структури.

### ***Вплив легувальних елементів на властивості фериту і карбідів***

*Вплив легувальних елементів на властивості фериту.* Легувальні елементи, розчиняються у фериті і, як правило, зміцнюють  $\alpha$ -фазу. Для оцінки внеску різних елементів у підвищення міцності сталей використовують формулу, у якій враховується коефіцієнт  $K_i$  зміцнення фериту при введенні домішкового легувального елемента та концентрація  $i$ -го елемента у фериті. Значення коефіцієнтів  $K_i$  для елементів, що входять до складу легованих сталей, наведені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1. Коефіцієнт зміцнення фериту при легуванні елементами у кількості 1% (мас.)

Елемент	<i>C+N</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
$K_i$	467	8,6	8,2	6,0	3,9	3,3	3,1	3,0	1,1	0,3

Найінтенсивніше підвищують міцність такі елементи, як марганець і кремній (рисунок 9.2, а), але легування значно знижує пластичність і ударну в'язкість (рисунок 9.2, б). Єдиний елемент, який позитивно впливає на ударну в'язкість і пластичність, це нікель.

Виходячи з цього, кількість легувальних елементів зазвичай обмежується (2-4 %), якщо не йдеться про спеціальні високолеговані сталі. Тому за рахунок одного легування неможливо досягти високої конструкційної міцності. Вона може бути досягнута тільки при використанні термічної обробки. Отже, леговані сталі раціонально використовувати *лише в термообробленому стані*.

*Вплив легувальних елементів на карбідну фазу.* Всі легувальні елементи поділяються на карбідоутворюючі та не карбідоутворюючі.

До останніх належать *Si*, *Ni*, *Al*, *Cu* – в сталях ці елементи не утворюють карбідів. Більшість елементів, якими легують сталі, є карбідоутворюючими (*Cr*, *Mn*, *Mo*, *Ti*, *W*, *V*, *Co*, *Nb*).

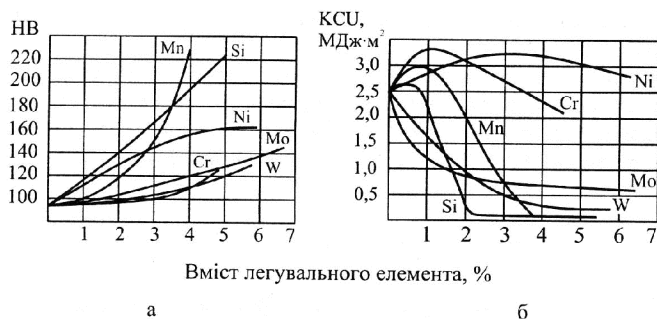


Рис. 9.2. Вплив легувальних елементів на твердість (а) та ударну в'язкість(б) фериту

Легувальні елементи можуть входити до складу цементиту, утворюючи легований цементит. Якщо ж сталь містить достатню кількість карбідоутворюючого легувального елемента, він може самостійно утворювати сполуки з вуглецем. Такі карбіди називаються спеціальними (наприклад  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $WC$ ,  $Mo_2C$ ). Спеціальні карбіди мають значно більшу твердість, ніж легований цементит. Тобто, сталі, леговані значною кількістю карбідоутворюючих елементів при одній і тій же кількості карбідної фази, будуть мати вищу твердість, ніж сталі без спеціальних карбідів. До того ж спеціальні карбіди забезпечують більшу дисперсність.

### **Вплив легувальних елементів на прогартовуваність**

Як відомо, легувальні елементи (крім *Co*) зсувають вправо *S*-подібну діаграму та сприяють підвищенню прогартовуваності.

Зміна легуючими елементами температурно-часових умов перетворення аустеніту призводить до того, що для легованих сталей характерні менші критичні швидкості охолодження та більша їх прогартовуваність. Найістотніше прогартовуваність збільшують хром, нікель, молібден, марганець. Карбідоутворюючі елементи підвищують прогартовуваність лише, якщо вони повністю розчиняються в аустеніті під час гартування. Коли температура гартування

залишається в межах 800-900 °С, то карбіди вольфраму, ніобію, титану, ванадію не переходять у твердий розчин і під час розпаду аустеніту стають центрами вторинної кристалізації, знижуючи прогартовуваність. Сильно підвищує прогартовуваність бор, який додається у сталь у тисячних відсотка.

Найбільший вплив на критичний діаметр чинить комплексне легування. Підвищення прогартовуваності при легуванні сталі 40 чітко видно з таблиці 9.2.

Таблиця 9.2. Критичний діаметр вуглецевої та легованих сталей з вмістом вуглецю 0,4 %

Марка сталі	D <sub>кр</sub> , мм	Охолоджувальне середовище
40	12	вода
40X	20	вода
40X	15	олива
40ХГР	30	олива
40ХГНР	40	олива

Як видно, критичний діаметр сталі 40X навіть при гартуванні в оливі більший, ніж у сталі 40 при гартуванні в воді.

Раніше відмічалось велике значення прогартовуваності при виборі марки сталі, особливо для важко навантажених відповідальних виробів, оскільки після гартування з відпуском у разі наскрізної прогартовуваності властивості виробу вищі порівняно з не наскрізною завдяки формуванню структури зернистого типу по всьому перерізу. Тому *підвищення прогартовуваності є головною метою легування конструкційних сталей.*

### ***Вплив легувальних елементів на процеси, що відбуваються при відпуску***

Легувальні елементи затримують розпад мартенситу та укрупнення карбідних частинок, внаслідок чого після однакового відпуску твердість легованих сталей вища, ніж у вуглецевих (при однаковій кількості вуглецю). Легування інструментальних сталей сильними карбідоутворюючими при їх достатній кількості дозволяє зберігати мартенситну структуру до температури ~500 °С і вище, тобто зберігати високу твердість при нагріванні інструменту протягом

певного часу. Така властивість сталі називається *теплостійкістю* (при нагріванні нижче 600 °С) або *червоностійкістю* (при нагріванні вище 600 °С). Отже, головною метою легування інструментальних сталей є підвищення теплостійкості (червоностійкості).

Легованим сталям притаманне явище *відпускної крихкості*, що може значно знизити в'язкість і пластичність сталі. Слід згадати, що відпускна крихкість I роду спостерігається при відпуску у області 300 °С у легованих (а також і вуглецевих) сталей. Вона не залежить від швидкості охолодження і пов'язана з нерівномірністю перетворень відпущеного мартенситу. Процес перетворень відбувається швидше біля меж зерен у порівнянні з об'ємами усередині зерна. Тому поблизу меж створюються концентрації напруг, межі робляться крихкими. Відпускна крихкість I роду “незворотна”, тобто при повторних нагріваннях тих же деталей не спостерігається.

Відпускна крихкість II роду спостерігається у легованих сталей при повільному охолодженні після відпуску в області температур 450-650 °С. При високому відпуску по межах зерен відбувається утворення і виділення дисперсних включень карбідів, прикордонна зона зерна обідняється легуючими елементами. При наступному повільному охолодженні відбувається дифузія фосфору з внутрішніх об'ємів зерна до меж. Прикордонні зони зерна збагачуються фосфором, міцність меж знижується, ударна в'язкість падає. Швидке охолодження після відпуску зменшує схильність до відпускної крихкості.

Відпускна крихкість II роду «зворотна», тобто при повторних нагріваннях і повільному охолодженні тих же сталей у небезпечному інтервалі температур цей дефект може повторитися. Тому ці сталі не можна використовувати для роботи з нагріванням до 650 °С без наступного швидкого охолодження (наприклад, штампи для гарячого штампування).

### ***Вплив легувальних елементів на розмір аустенітного зерна***

Відомо, що чим дрібніше зерно в сталі, тим більші міцність, пластичність, ударна в'язкість, тріщиностійкість, нижча температура в'язко-крихкого переходу  $t_{кр}$ .

Більшість легувальних елементів сприяють подрібненню зерна, *Si* та *Mn* підвищують схильність аустенітного зерна до росту, а

*Co, Cu, Ni* на розмір зерна не впливають. Найсильніше подрібнюється зерно при введенні таких елементів як *Ti, V, W, Zr, Mo, Nb*.

### ***Вплив легувальних елементів на поріг холодноламкості***

Тільки *Ni* знижає  $t_{кр}$  при будь-якому його вмісті в сталі. Хром при кількості  $\sim 0,5\%$  незначно знижає  $t_{кр}$ , а зі збільшенням хрому температура  $t_{кр}$  підвищується. Вплив кількості нікелю та хрому на поріг холодноламкості для сталі з вмістом вуглецю  $0,3\%$  наведений у таблиці 9.3. Решта елементів підвищують  $t_{кр}$  (рис. 9.3).

Таблиця 9.3. Вплив кількості *Ni* та *Cr* на поріг холодноламкості  $t_{кр}$  (сталь з  $0,3\% C$ )

Кількість елемента, %	Поріг холодноламкості, $t_{кр}$	
	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>
0	– 50	– 50
0,5	– 70	– 60
1,0	– 80	– 45
3,0	– 83	+10
5,0	– 90	+20

Таким чином, легування, крім нікелю, може привести до окрихчення сталі; однак, слід мати на увазі, що більшість елементів подрібнює зерно, що сприяє сильному зниженню  $t_{кр}$ , незважаючи на окрихчення. Тому раціональне легування дозволяє досягти поліпшення властивостей сталей.

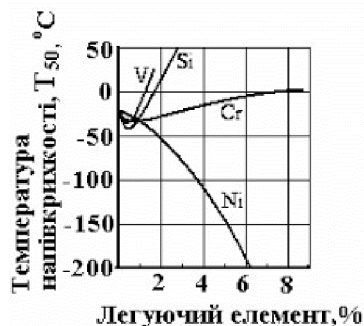


Рис. 9.3. Вплив легуєчих елементів на поріг холодноламкості

Досвід свідчить, що найкраще поєднання властивостей вдається досягати при комплексному легуванні карбідоутворюючими та не карбідоутворюючими елементами. Приклади марок сталей, де використаний принцип комплексного легування: 30XC, 35XNM, 20X2H4BA, 40XC, 40XH, 30XГC і т. ін. Якщо в склад сталі входять тільки

карбідоутворюючі елементи, то тут кращі результати дає легування кількома елементами замість одного в тій же кількості: 18ХГТ, 50ХФА, 40ХГР та ін.

Нижче наведена таблиця 9.4, яка узагальнює дані про вплив легуючих елементів на структуру, властивості та режими термообробки сталей.

## 9.4 Конструкційні сталі

Конструкційні сталі, які використовують для *конструкцій і деталей машин*, за призначенням поділяються на ті, що цементують (*цементовані*), ті, що покращують (*покращувані*), *ресорно-пружинні* та *підшипникові*.

*Сталі для цементації.* Сталі цієї групи призначені для виготовлення деталей, що підлягають цементації. До них належать сталі з кількістю вуглецю  $\leq 0,3 \%$ .

Як відомо, сталі після цементації піддають гартуванню та низькому відпуску. Ступінь зміцнення серцевини обумовлюється прогартуваністю сталі, що в свою чергу залежить від легування. Залежно від ступеню зміцнення серцевини внаслідок термічної обробки ці сталі поділяють на три групи: з незміцнюваною серцевиною, зі слабо зміцнюваною серцевиною, із сильно зміцнюваною серцевиною.

Таблиця 9.4. Вплив легуючих елементів на структуру, властивості та режими термообробки сталей

Елемент	Вплив на фази та властивості	Вплив на режими термічної обробки
C	Збільшення кількості карбідів. Підвищення міцності, зниження в'язкості	Знижується температура гартування
Si	Зміцнення твердого розчину без впливу на карбідну фазу, зниження в'язкості та холодостійкості	Підвищується температура гартування та прогартуваність. При вмісті до 2 % збільшується критична швидкість охолодження. Підвищується температура відпуску на задану міцність



Ni	Підвищення в'язкості та холодостійкості твердого розчину. Практично не впливає на міцність	Значно збільшується загартовуваність та прогартовуваність
Mn, Cr, W, Mo	Зміцнення твердого розчину та підвищення стабільності карбідів типу $Me_3C$ . невелике підвищення в'язкості	Трохи підвищується температура гартування та відпуску, збільшується прогартовуваність
Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	Зміцнення твердого розчину та формування карбідів легуючих елементів високої стійкості. В'язкість підвищується мало	Підвищується температура гартування, трохи збільшується прогартовуваність, зменшується схильність до росту зерна при нагріванні, підвищується температура відпуску на задану міцність.
W, Mo, Nb, Ti, Al, N	Утворення дисперсних зміцнюючих фаз. Підвищення міцності, зниження в'язкості при незмінному розмірі зерна. При подрібненні зерна підвищення в'язкості	Підвищується температура гартування, регламентуються умови відпуску (температура, тривалість, швидкість охолодження)

У сталях першої групи після кінцевої термообробки структура в серцевині внаслідок малої прогартовуваності залишається феритно-перлітною, а їх властивості відповідають рівню незагартованого стану. З підвищенням легування в серцевині з'являються ділянки з мартенситною структурою (при наскрізній прогартовуваності – навіть чисто мартенситна структура). Однак у зв'язку з тим, що мартенсит у серцевині виробу є мало-вуглецевим, при високій міцності він не втрачає своєї пластичності.

Конкретну марку сталі для тієї чи іншої деталі вибирають з урахуванням умов роботи та вимог до виробу: легконавантажені деталі, основною вимогою до яких є висока зносостійкість поверхні, виготовляють з вуглецевих та низьковуглецевих сталей першої та другої груп (15, 20, 25 та ін. – перша група; 20Г, 20Х, 20ХН, 15ХА та ін. – друга група). Для важконавантажених – групи 3 (18ХГТ, 20ХГР, 25ХГМ, 20ХН3А, 18Х2Н4ВА та ін.).

*Покращувані сталі.* Сталі цієї групи призначені для виготовлення деталей, що підлягають покращенню (поліпшенню); до них належать вуглецеві та леговані сталі з вмістом вуглецю 0,3-0,5%. Їх піддають гартуванню з наступним відпуском, як правило, високим. Загальна кількість легуючих елементів у таких сталях становить 3-5%, основний легуючий елемент – хром. Приклади покращуваних сталей: 40, 45, 40X, 35ХГТ, 38ХС, 40ХН і т. ін. З них виготовляють вали, шатуни, шестірні, важконавантажені болти, пальці, ротори турбін, деталі редукторів та ін.

Вибір конкретної марки сталі залежить від навантаженості деталі та її перерізу. Для важко навантажених виробів легування має забезпечити прогартуваність по всьому перерізу; якщо ж рівень зовнішніх напружень відносно невисокий, наскрізна прогартуваність не є обов'язковою вимогою, і виріб можна виготовити з менш легованої, а отже, дешевшої сталі. В залежності від прогартуваності конструкційні сталі поділяють на п'ять груп (таблиця 9.5).

Таблиця 9.5. Критичний діаметр  $D_{кр}$  для сталей різного легування

Група	Приклади марок сталей	$D_{кр}$ , мм
I	40,45	$\leq 10$
II	40X, 40XP	$\leq 20-25$
III	40XГР, 35ХГС	$\leq 30-35$
IV	40ХНМ, 40ХГНР	$\leq 40-60$
V	38ХНЗМФ	$\geq 100$

*Ресорно-пружинні сталі.* Сталі цієї групи призначені для виготовлення пружних елементів, вміст вуглецю в них становить 0,5-0,8 %. Оскільки головна вимога до пружних елементів – забезпечення високої границі текучості, такі сталі піддають гартуванню з середнім відпуском. Прикладами таких сталей є: 55Г, 60, 65, 65Г, 60С2, 55С2А, 60С2А, 50ХФА, 60С2ХФА та ін. Особливо високі властивості притаманні сталям з кремнієм. Цей елемент значно зміцнює ферит, збільшує прогартуваність і затримує укрупнення карбідних частинок в процесі відпуску. Наприклад, сталь 60С2ХФА після гартування та відпуску при 410 °С має:  $\sigma_s = 1900$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1700$  МПа;  $\delta = 5\%$ ;  $\psi = 20\%$ .

При легуванні бором (0,003 %) підвищується поріг пружності та прогартуваності сталі (55ХГР, 50ХФРА). Для підвищення опору втомі і зменшення чутливості до концентраторів напружень пружини і листи ресор у готовому вигляді піддають поверхневому наклепуванню струменевою обробкою дробом.

*Підшипникові сталі.* Сталі цієї групи призначені для виготовлення кульок, роликів, кілець підшипників кочення. Вони містять ~ 1% хрому та легуються *Cr, Mn, Si*. Це такі сталі як ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ. З підвищенням ступеня легування прогартуваність цих сталей збільшується. Для підвищення прогартуваності її додатково легують марганцем і кремнієм (ШХ15СГ, ШХ20СГ).

Термічна обробка – гартування з наступним низьким відпуском. Внаслідок значного вмісту вуглецю вони після термообробки мають високу твердість (62-66 HRC), що забезпечує необхідну зносостійкість та контактну витривалість. Однак, високовуглецевий мартенсит є фазою крихкою, тому при виплавці цих сталей велику увагу приділяють зменшенню кількості крихких неметалевих включень. Це сприяє підвищенню довговічності підшипників.

Для підшипників, які працюють в умовах високих динамічних навантажень, високовуглецеві сталі не забезпечують необхідної тріщиностійкості. В такому разі підшипники виготовляють з легованих сталей, що цементують (наприклад, 20Х2Н4А, 18ХГТ). В таблиці 9.6 узагальнені загальні дані з термообробки для різних груп конструкційних сталей.

Структура серцевини виробів для всіх груп сталей обумовлюється рівнем легування та перерізом деталі. У цементованих сталей вона може змінюватися від низьковуглецевого мартенситу відпуску (наскрізна прогартуваність) до феритно-цементитної суміші пластинчастого типу (не наскрізна прогартуваність). У сталях інших груп в останньому випадку в серцевині також можуть утворюватися структури феритно-цементитної суміші пластинчастого типу, що є причиною погіршення конструкційної міцності.

Таблиця 9.6. Термічна обробка та структури конструкційних сталей

Група сталі	Вміст С, %	Марка сталі	Термічна обробка	Структура поверхні виробу після термообробки
I. Цементовані	$\leq 0,3$	20, 18ХГТ	Цементация, гартування, низ. відпуск	мартенсит відпуску
II. Покращувані	0,3 – 0,5	40, 40Х	Гартування, високий відпуск	сорбіт відпуску
III. Ресорно-пружинні	0,5 – 0,8	60, 60С2	Гартування, середній відпуск	тритит відпуску
IV. Підшипникові	$\sim 1$	ШХ15, ШХ15СГ	Гартування, низький відпуск	мартенсит відпуску

## 9.5 Інструментальні сталі

За хімічним складом інструментальні сталі поділяються на *вуглецеві, леговані і високолеговані*; за призначенням – на сталі для *різального і вимірювального інструменту* та сталі для *штампувального інструменту*.

*Сталі для різального інструменту.* Основною вимогою до сталей для різального інструменту є високі значення твердості, зносостійкості та теплостійкості. Термообробка різального інструменту полягає, як правило, в гартуванні з низьким відпуском, що забезпечує високі твердість та зносостійкість. Оскільки в процесі роботи різальний інструмент нагрівається, то якщо робоча температура інструменту перевищить температуру відпуску, твердість буде падати завдяки розпаду мартенситу та укрупнення частинок карбідної фази. Тому інструмент буде затуплюватися. Отже, для стійкості різального інструменту теплостійкість має дуже велике значення.

Також важливою характеристикою таких сталей є прогартовуваність. На перший погляд, ця вимога здається зайвою, оскільки мартенситна структура з високою твердістю потрібна тільки на лезі інструменту. Але в разі значних розмірів інструменту охолодження уповільнюється та його швидкість може стати недостатньою для отримання високої твердості навіть на поверхні. Тобто, після однакового відпуску легованих сталей твердість буде тим вища, чим більш легованою є сталь, так як легувальні елементи уповільнюють розпад мартенситу та укрупнення карбідів.

Залежно від теплостійкості інструментальні сталі для різального інструменту поділяють на: нетеплостійкі (вуглецеві та леговані сталі, які містять < 3 % хрому при загальній сумі легуючих елементів 3-4 %); напівтеплостійкі (сталі, які містять 5-18%Cr, 3-4%V); теплостійкі (високолеговані сталі ледебуритного класу), які називаються *швидкорізальними*.

До *вуглецевих нетеплостійких сталей* належать якісні сталі У7 -У13 та високоякісні У7А - У13А. Через невелику прогартовуваність їх використовують для дрібного інструменту з  $\varnothing < 25$  мм (дерево-обробний інструмент, фрези, зенкери, свердла для обробки м'яких сталей, зубила, кернери, ручні мітчики, ножівки, напилки і т. ін.).

До *легованих нетеплостійких сталей* належать сталі Х, 9ХС, 11Х, 13Х, ХВГ, ХВСГ, ХВ4, В2Ф та ін. Прогартовуваність таких сталей вища, тому їх використовують для інструменту діаметром до 35 мм і навіть після гартування в олив'ї одержують необхідну твердість. Так, наприклад, сталі ХВ4, В2Ф після гартування мають твердість 64 – 67 HRC та використовуються для граверного інструменту або пил для металу (їх інколи називають алмазними).

З *легованих напівтеплостійких сталей* (Х12, 7Х3, 8Х3) виготовляють ножі, ножівки, свердла, мітчики, розгортки, протяжки діаметром більше 25 мм.

До *легованих теплостійких сталей* належать високолеговані *швидкорізальні* сталі, які за теплостійкістю поділяються на дві групи: нормальної продуктивності (помірної теплостійкості – до 620 °С) та підвищеної продуктивності (високої теплостійкості – до 640 °С). Підвищення теплостійкості на 20 °С збільшує стійкість інструменту у 1,5 рази. При обробці виробів інструментом з таких сталей швидкість різання зростає у два-три рази порівняно з вуглецевими сталями, причому стійкість інструменту збільшується у 20-30 разів.

Найпоширенішими марками швидкорізальних сталей першої групи є: P6, P9, P12, P18, P6M3, P6M5; другої групи – сталі з кобальтом: P6M5K5, P9M4K8, P18K5Ф2 та ін.

### *Особливості термообробки швидкорізальних сталей.*

Інструментальні сталі зазвичай піддають гартуванню з низьким відпуском (140-170 °С), що забезпечує утворення структури відпущеного мартенситу з певною кількістю надлишкових карбідів та твердість 60-65 HRC. При цьому в сталях, як правило, присутня невелика кількість залишкового аустеніту (до 5 %), але він не впливає суттєво на властивості.

Для швидкорізальних сталей, у зв'язку з їх високою легованістю, температура нагрівання під гартування досягає майже лінії солідуса (1250-1280 °С). При цьому використовується дво- або трикратний відпуск при температурі 560-570 °С (рис. 9.4). Для захисту лез від окислення та знеуглецювання через високу температуру під гартування процес здійснюється у соляних ваннах.

Як видно з рисунка 9.4, сталь під гартування нагрівається з ізотермічними витримками, які призначені для вирівнювання температури по перерізу виробу. Справа в тому, що такі сталі мають нижчу теплопровідність у порівнянні з менш легованими, і перепад температур навіть при нагріванні у соляних ваннах може призвести до виникнення напружень, і як наслідок цього – тріщин. Окрім того,

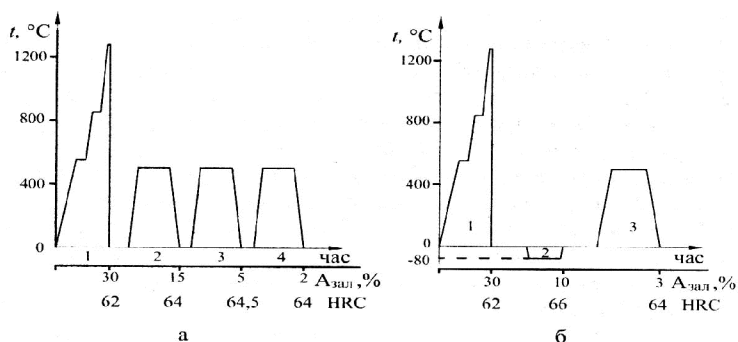


Рис. 9.4. Режими термічної обробки швидкорізальних сталей: а – без обробки холодом, б – з обробкою холодом

кількість небажаного залишкового аустеніту після гартування збільшується та може досягати 25-35%.

Для того, щоб позбавитися залишкового аустеніту, загартовану сталь піддають багаторазовому відпуску при 550-570 °С. На рисунку 9.4 наведені режими термообробки швидкорізальної сталі (1 – гартування; 2, 3 4 – відпуск) та вказано відсоток залишкового аустеніту ( $A_{зал}$ ) і твердість після кожного відпуску. Для зменшення кількості залишкового аустеніту можна застосовувати обробку холодом загартованого інструменту з наступним відпуском при 550-570 °С (рисунк 9.4, б: 1– гартування; 2 – обробка холодом; 3 – відпуск).

Приклади різних груп інструментальних сталей та дані про їх теплостійкість, прогартовуваність, термічну обробку та геометричні параметри наведено в таблиці 9.7.

Таблиця 9.7. Сталі для різального інструменту

Група	Марки сталей	Прогартуваність	Теплостійкість	Діаметр інструменту, мм	Термообробка	Структура
Вуглецеві	У7-У13 У7А-У13А	невелика	нетеплостійкі (150-200 °С)	$\leq 25$	Гартування + низький відпуск	Мартенсит відпуску + цементит
Леговані	Х, 11Х, 9ХС, ХВГ, ХВСГ	підвищена висока	нетеплостійкі (250-260°С)	$\leq 30$ $\leq 35$ $\leq 45$ $\leq 100$	Гартування + низький відпуск	Мартенсит відпуску + карбіди
	Х12, 7Х3	підвищена	напівтеплостійкі (350-380°С)	$\leq 100$		Мартенсит відпуску + спеціальні карбіди
Високолеговані	Р6, Р9, Р18, Р6М5	висока	теплостійкі (620 °С)	необмежений	Гартув. (1050-1080°С) + трикратний відпуск 570 °С	Мартенсит відпуску + спеціальні карбіди
	Р6М5К5 Р9М4К8	висока	теплостійкі (640 °С)			

*Сталі для вимірювального інструменту.* Головними вимогами для вимірювального інструменту є висока зносостійкість і постійність розмірів.

Висока зносостійкість досягається гартуванням високоуглецевих легованих сталей з наступним низьким відпуском. Для забезпечення стабільності розмірів та позбавлення залишкового аустеніту, який завжди присутній у таких сталях після гартування, сталі піддають обробці холодом, а потім відпускають при 120-130 °С.

Найчастіше для вимірювального інструменту використовують сталі X, ХВГ, 12Х1. Деякі інструменти (вимірювальні скоби, лінійки та інші плоскі та довгі інструменти) виготовляють з листових сталей 15, 15Х з наступною цементацією та гартуванням.

*Сталі для штампувального інструменту.* Сталі цієї групи за призначенням поділяються на сталі для штамів холодного та гарячого деформування.

Основними вимогами до сталей для штамів холодного деформування є: високі твердість, міцність та зносостійкість при задовільній в'язкості. У процесі роботи штампи можуть розігріватися до 250-350 °С. В такому разі вони повинні мати підвищену теплостійкість (до 400 °С). Для великих штамів необхідно також забезпечити відповідну прогартовуваність.

Легконавантажені невеликі штампи виготовляють з углецевих сталей У10, У11, У12, але ширше застосовують леговані (Х, ХВСГ) та високолеговані (3Х2В8, Х12Ф1, Х12М і т. ін.) сталі. Їх піддають гартуванню з низьким відпуском для одержання структури відпущеного мартенситу з карбідами, кількість яких у високолегованих сталях ледебуритного класу може сягати 16-17%, а твердість після термообробки становитиме 60-63 HRC.

*Сталі для штамів гарячого деформування* повинні поєднувати достатню міцність і в'язкість при підвищених температурах, мати високу зносостійкість і теплопровідність для кращого відведення тепла від заготовки. Крім того, вони мають бути здатними витримувати багаторазове нагрівання і охолодження без утворення тріщин. Для великих штамів необхідно також забезпечити достатню прогартовуваність.

Штампи гарячого деформування виготовляють з легованих напівтеплостійких (5ХНМ, 5ХГМ) та теплостійких (3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС та ін.) сталей. Їх піддають гартуванню та відпуску в



інтервалі 400-600 °С залежно від марки. У результаті отримують суміш структур троститу та сорбіту з твердістю 40-45 HRC.

З вуглецевих сталей У10, У11, У12 та легованих Х, ХВСГ (холодного деформування) виготовляють витяжні штампи; з високолегованих сталей: Х12Ф1, Х12М, 3Х2В8 – волочильні дошки, згинальні, формувальні, просічні штампи; Х6ВФ, 6Х6В3МФС – різенакатувальні, зубонакатувальні інструменти, ножі. З легованих сталей (гарячого деформування) 5ХНМ, 5ХГМ виготовляють молотові штампи, пневматичні молоти; з високолегованих 3Х2В8Ф, 3Х2В8М, 4Х5МФ1С, 4Х2В5МФ – важконавантажені молотові штампи, висадні штампи, прес-форми лиття під тиском кольорових сплавів.

## 9.6 Спеціальні сталі

До цієї групи належать високолеговані сталі, які мають особливі властивості (зносостійкість, корозійна стійкість, жароміцність, задані магнітні властивості і т. ін.).

**Зносостійкі сталі.** Як відомо, довговічність деталей машин і других виробів у багатьох випадках пов'язана зі зносостійкістю матеріалу, з якого вони виготовлені. Для забезпечення зносостійкості сталь повинна мати високі значення міцності, опору крихкому руйнуванню, контактної витривалості.

До головних видів зносу відносяться: абразивний, адгезійний, корозійний знос та поверхнева втолюваність. Серед них найпоширенішим є абразивний знос, який відбувається в процесі інтенсивного руйнування поверхні деталі при терті та виражається в локальній пластичній деформації та мікрорізанні абразивними частинками поверхонь тертя. Пластична деформація накопичується у поверхневому шарі у міру збільшення кількості циклів при зношуванні (рисунк 9.5), внаслідок чого зростає неоднорідність напруженого стану та

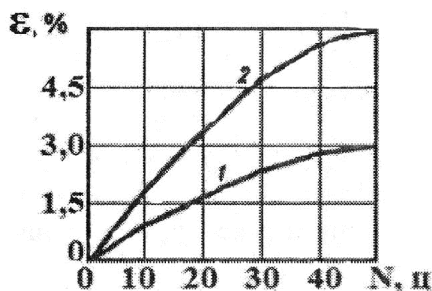


Рис. 9.5. Вплив кількості циклів при зношуванні на величину пластичної деформації в поверхневих шарах сталей Х13 (1) та 35ГЛ (2)

структури поверхневого шару. Виникають та розповсюджуються тріщини, що призводить до руйнування поверхневого шару.

Стійкість проти зношування зростає з підвищенням твердості, однак з різною інтенсивністю залежно від хімічного та фазового складу сталі. Аналіз показує, що відносна зносостійкість чистих металів і сталей у рівноважному стані (після відпалу) прямо пропорційна їх твердості, але для термооброблених сталей спостерігається більш складна залежність зносостійкості від твердості (рис. 9.6.)

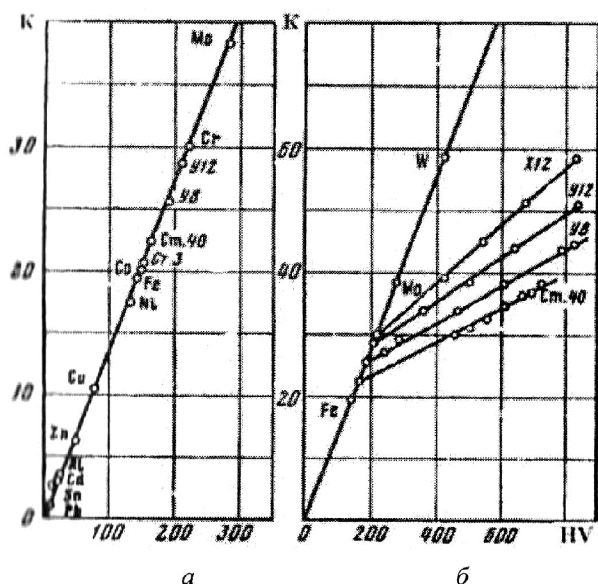


Рис. 9.6. Вплив твердості (HV) на відносну зносостійкість (K) металів і сталей у рівноважному стані (а) та сталей після гартування та відпуску (б)

При однаковій твердості сталі, які мають структуру мартенситу з дрібнозернистими карбідами, більш зносостійкі, ніж сталі зі структурою мартенситу без карбідів. Сталі, що мають грубозернисту структуру, менш зносостійкі, ніж сталі з дрібнозернистою структурою.

До зносостійких сталей належать *високомарганцеві сталі аустенітного класу типу 110Г13Л та графітізовані сталі.*

Для деталей, що експлуатуються в умовах абразивного тертя, високого тиску та ударних навантажень, використовують литу сталь 110Г13Л. Завдяки високому вмісту вуглецю (~1 %) і марганцю (~13 %) сталь належить до аустенітного класу. Ця сталь важко оброблюється різанням, тому деталі з неї отримують литтям. Після гартування від температур 1000-1100 °С сталь має однофазну аустенітну структуру та, як наслідок, високу пластичність та ударну в'язкість. Твердість сталі невелика (180-220 НВ), але при експлуатації в умовах значного тиску та дії ударних навантажень виріб сильно наклепується та твердість поверхні сягає ~ 600 НВ. При додатковому легуванні сталі хромом, молібденом та ін. елементами може відбуватися часткове мартенситне перетворення, що в свою чергу збільшує твердість до ~ 800 НВ. Сталь 110Г13Л використовують для траків гусениць, хрестовин рейок, черпаків екскаваторів, деталей каменедробарок тощо.

*Графітизовані* сталі містять 1,5-1,75 % вуглецю і 1-1,5 % кремнію. Наявність такої кількості кремнію у високовуглецевій сталі викликає виділення частини вуглецю у вигляді графіту. У відпаленому стані структура сталі складається з перліту та графіту, причому графіт виділяється у компактній формі, аналогічно тому, як це відбувається у високоміцному чавуні. Після гартування сталь має структуру мартенситу та графіту, що забезпечує високу зносостійкість за рахунок мастильної дії графіту.

З графітизованих сталей виготовляють литі колінчасті вали, штампи, калібри, траки та інші деталі, які експлуатуються в умовах зносу при значному тиску. Ці сталі випускаються промисловістю під умовними номерами ЭИ 293, ЭИ 336, ЭИ 666.

***Корозійностійкі (нержавіючі) та жаростійкі сталі.*** Корозія – це руйнування металу під впливом навколишнього середовища. Це явище дуже шкідливе. Для відновлення спотвореного корозією обладнання та конструкцій щорічно витрачається не менше 10% продукції світового металургійного виробництва.

Розрізняють хімічну та електрохімічну корозію. *Хімічна корозія* відбувається під впливом сухих газів і неелектролітів (нафта та її похідні), а *електрохімічна* – під впливом водних розчинів кислот, лугів, солей. До електрохімічної належать також атмосферна та ґрунтова корозії.

Найпоширенішим видом хімічної корозії є газова корозія при високих температурах – процес взаємодії з киснем або активними

газовими середовищами (цей вид корозії характерний для лопаток газових турбін, сопел реактивних двигунів, арматури печей).

Електрохімічна корозія має місце при електричному контакті двох металів з різними електрохімічними потенціалами, які знаходяться в електроліті. Інтенсивність електрохімічного процесу зумовлюється різністю потенціалів елементів. Така корозія може бути *рівномірною, місцевою та міжкристалітною*. Рівномірна характерна для однорідних твердих розчинів. Місцева має вигляд ушкоджень в локальних місцях структури. Внаслідок її на поверхні виробу утворюються точкові ушкодження (піттинг) або плями, які є концентраторами напружень. Міжкристалітна корозія, яка розвивається по границях зерен, є найнебезпечнішим видом корозії. Внаслідок її відбувається корозійне розтріскування, сталь окрихчується.

*Сталі, стійкі проти корозії*, поділяються на дві групи: *корозійностійкі (нержавіючі)* та *жаростійкі*.

Жаростійкість – це властивість матеріалу чинити опір корозії при температурі вище 550 °С. Згідно з цим до *корозійностійких* належать сталі, стійкі проти всіх видів корозії при температурах нижче 550 °С, до *жаростійких* – вище цієї температури. Стійкість проти корозії сталей першої групи підвищується головним чином введенням в сталь великої кількості хрому ( $\geq 13\%$ ). При такому вмісті цього елемента електрохімічний потенціал різко (стрибкоподібно) підвищується, стає позитивним; електрохімічна корозія припиняється.

В жаростійкі сталі, крім хрому, додають *Si*, *Al*, що утворюють щільну оксидну плівку, яка перешкоджає проникненню кисню в глибокі метали і припиняє корозію. Тому жаростійкі сталі легують хромом ( $>13\%$ ), алюмінієм ( $\sim 5\%$ ), кремнієм ( $\sim 2,5\%$ ). Чим вище вміст хрому в сталі, тим до більш високих температур сталь залишається жаростійкою. Так, сталь з 15-17 % хрому жаростійка до 950 °С, з 25 % хрому – до 1100 °С.

Оскільки до цієї групи належать високолеговані сталі, серед них, залежно від кількості вуглецю та легуючих елементів, присутні сталі різних класів. Це зумовлює їх властивості та галузі використання. Узагальнені данні про сталі цієї групи наведені у таблиці 9.8.

Слід відзначити, що жаростійкі сталі можуть також використовуватися як нержавіючі, але це нераціонально. Оскільки жаростійкі сталі містять більшу кількість легуючих елементів і через це дорожчі.

Таблиця 9.8. Властивості та галузі використання нержавіючих та жаростійких сталей

Клас сталі	Марки	Властивості				Викорис- тання
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	
Сталі нержавіючі						
Ферит- ний (мар- тенсит- ноферит- ний)	08X13, 12X13	600	420	20	60	Побутова техніка, посуд, фольга, хімічне обладнання
Мартен- ситний	20X13, 30X13, 40X13	$\geq 660$	$\geq 450$	16	$\sim 50$	Хірургічний інструмент, резервуари для рідкого палива лопатки турбін
Аусте- нітний	12X18H10T	550- 600	200- 230	50	50 - 60	Лопатки турбін, хімічна апаратура, баки для палива ракет
Сталі жаростійкі						
Ферит- ний	08X17, 15X28, 15X25T	450- 550	250- 300	20	45	Обладнання заводів харчової промисло- вості
Мартен- ситний	40X9C2, 40X10C2T	750- 950	500- 750	10- 15	—	Клапани автомобіль- них і авіаційних двигунів
Аусте- нітний	10X14Г14Н4Т	650	250	35	—	Обладнання для роботи при t від –253 до +700°С

**Жароміцні сталі.** Жароміцність – це властивість матеріалу чинити опір деформації та руйнуванню при високих температурах. Основними показниками жароміцності є *тривала міцність і повзучість*. Перший показник характеризує опір руйнуванню, другий – опір деформації.

В процесі витримки при високих температурах, властивості, які характеризують міцність металу безперервно знижуються, причому, міцність знижується тим інтенсивніше, чим вище температура. У зв'язку зі зміною властивостей з плином часу для деталей, які експлуатуються тривалий час, розрахунки ведуть за характеристиками металу після заданого для виробу терміну служби – за *тривалою міцністю*.

Тривалу міцність характеризують показником *умовної границі тривалої міцності*, за яку приймається найбільше напруження, яке не призводить до руйнування матеріалу при даній температурі за заданий час. Тривалу міцність позначають із зазначенням температури і тривалості випробувань, наприклад,  $\sigma_{10^5}^{570} = 105 \text{ МПа}$ . Тут верхній індекс – температура, а нижній – час випробувань у годинах. Такий запис показує, що при температурі 570 °С максимальне напруження, яке витримає сталь без руйнування після експлуатації протягом ста тисяч годин, дорівнює 105 МПа. Експериментально тривалу міцність визначають при проведенні тривалих випробувань на розтяг зразків при температурі, яка відповідає робочій температурі для даної деталі.

Другий показник жароміцності, *повзучість* – це зміна розмірів виробу під час його тривалої експлуатації в зоні підвищених температур при сталих напруженнях, нижчих за границю текучості для даної температури. Опір повзучості характеризують *умовною границею повзучості*, за яку приймають те напруження, яке спричиняє деформацію (або задану швидкість деформації) за обумовлений час експлуатації при заданій температурі.

Для визначення границі повзучості деформацію (або її швидкість) вимірюють на другому відрізку так званої кривої повзучості (на стадії усталеної повзучості). Цей показник, як і тривала міцність, записується із зазначенням температури (верхній індекс) та деформації або швидкості деформації (нижній індекс):  $\sigma_{1/10000}^{570} = 56 \text{ МПа}$  або  $(\sigma_{1 \cdot 10^{-4}}^{570} = 56 \text{ МПа})$ . Тут 570 – температура експлуатації, а 1/10000 означає деформацію 1 % за 10000 годин ( $1 \cdot 10^{-4}$  означає швидкість деформації  $10^{-4}$  відсотків за годину).

Залежно від температури експлуатації та навантаження для виготовлення виробів використовують матеріали з різною жароміцністю. Якщо температура не перевищує 350 °С, застосовують звичайні сталі. Для більш високих температур необхідні жароміцні матеріали (таблиця 9.9).

Таблиця 9.9. Матеріали, які використовуються для деталей, що працюють при різних температурах

Робоча t, °С	Матеріал	Приклади марок сталей	Приклади виробів
350-570	сталі перлітного класу	12ХМФ, 15Х1М1Ф	Труби пароперегрівників, деталі циліндрів газових турбін, ротори, диски
		20Х3МВФ	Кріпильні деталі
570-650	сталі мартенситного класу	15Х11МФ, 18Х12ВНМФ	Лопатки парових турбін
		40Х9С2, 40Х10С2М	Клапани
650-900	сталі аустенітного класу	40Х14Н14В2М	Клапани дизелів, лопатки газових турбін
		10Х11Н20ТЗР	Камери згоряння, деталі реактивних двигунів
900-1000	сплави на основі нікелю (німоніки)	ХН77ТЮР, ХН55К10М10ТЮ	Деталі реактивних двигунів

## Питання для самоконтролю

1. За якими ознаками класифікуються леговані сталі та на які групи вони поділяються?
2. Як впливають легувальні елементи на критичні точки та структуру сталі після охолодження на повітрі?
3. В чому полягає вплив легувальних елементів на процеси, які відбуваються при відпуску? Як це впливає на властивості сталей?
4. Як впливають легувальні елементи на поріг холодноламкості та розмір зерна аустеніту?
5. Які сталі відносяться до покращуваних та тих, що цементують? Наведіть приклади сталей кожної групи.
6. Які сталі належать до ресорно-пружинних та підшипникових? Які основні вимоги до їх властивостей, яка термічна обробка? Наведіть приклади цих сталей.
7. За якими ознаками класифікують інструментальні сталі? Для яких інструментів використовують вуглецеві сталі?
8. Що таке швидкорізальні сталі, як їх маркують? Навіщо для них використовують обробку холодом?
9. На які групи поділяють сталі для штампувального інструменту? Наведіть приклади марок сталей кожної з груп.
10. Що таке графітізована сталь та де її використовують?
11. Чим можна пояснити велику зносостійкість сталі 110Г13Л тільки в умовах високого навантаження?
12. Наведіть приклади нержавіючих та жаростійких сталей. За рахунок чого досягаються потрібні властивості в цих сталях?
13. Що таке жароміцність та які показники її характеризують?
14. Як змінюється міцність металу з часом при високих температурах? Поясніть фізичні причини цієї зміни.
15. Чому для виробів, які тривало працюють при температурах 500-600°C, вибирають леговані сталі? Наведіть приклад якоїсь з марок теплостійкої сталі.



## РОЗДІЛ 10

### СПЛАВИ НА ОСНОВІ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

Сплави на основі кольорових металів (алюмінію, міді та ін.) широко використовують в автомобільній, тракторній, дорожній, авіаційній та інших галузях машинобудування. В останній час поширюється використання титанових сплавів. Взагалі існує тенденція зменшення частки сталевих і чавунних деталей в машинобудуванні у майбутньому за рахунок збільшення кількості виробів зі сплавів кольорових металів, оскільки це знижує масу машини та витрати палива, а також може привести до підвищення її довговічності за умови правильного вибору матеріалу та термообробки.

#### 10.1 Сплави на основі алюмінію

##### *Класифікація та маркування алюмінієвих сплавів.*

Алюміній – легкий метал з кубічною гранецентрованою ґраткою, не має алотропічних перетворень. Характерними властивостями алюмінію є: мала питома вага ( $\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$ ), висока пластичність ( $\delta = 30 - 40 \%$ ), низька твердість ( $\sim 25 \text{ НВ}$ ), міцність  $\sigma_{\text{в}} = 80 - 100 \text{ МПа}$ ; границя текучості ( $\sigma_{\text{т}} = 30 \text{ МПа}$ ), низька температура плавлення ( $t = 660^\circ\text{C}$ ).

Алюміній має високу тепло- та електропровідність (теплопровідність відпаленого алюмінію складає  $\sim 62\%$  від електропровідності відпаленої міді марки М1) та стійкістю проти атмосферної корозії, дії концентрованої азотної кислоти, повітря, забрудненого сірчистими газами і т. ін.

Стійкість алюмінію проти атмосферної корозії приблизно в 20 разів вища стійкості сталі. Корозійна стійкість алюмінію пояснюється утворенням на його поверхні щільної та міцної окисної плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , яка захищає його від корозії. Однак, алюміній легко руйнується під дією лугів, соляної кислоти, деяких інших мінеральних кислот.

Суттєвий вплив на властивості алюмінію чинять домішки. *Mn* та *Mg* знижують його електро- та теплопровідність, *Fe* – корозійну стійкість, *Si* – пластичність. Маркують алюміній літерою А та

тризначним числом, що вказує на вміст алюмінію. Наприклад: А 999 – вміст алюмінію більше 99,999% (вміст домішок – менше 0,001%); А995 – алюмінію більше 99,995% (вміст домішок – менше 0,005%); А99 – алюмінію більше 99,99% (вміст домішок – менше 0,01%); А97 – алюмінію більше 99,97% (вміст домішок – менше 0,03%); А95 – алюмінію більше 99,95% (вміст домішок – менше 0,05%).

У сучасній техніці як конструкційний матеріал використовують головним чином не сам алюміній, а сплави на його основі, які мають значно вищі механічні характеристики.

За технологічною ознакою (способом виготовлення) алюмінієві сплави поділяють на:

- *деформівні*, з яких одержують листи, прутки, труби, профілі тощо. Для підвищення корозійної стійкості їх іноді плакують, тобто покривають тонким шаром чистого алюмінію в процесі гарячого прокатування чи пресування, проте, плакування дещо знижує міцність сплавів;

- *ливарні*, які використовують для виготовлення фасонних виливків;

- *порошкові*, одержані методом порошкової металургії – спечені алюмінієві порошки (САП) та спечені алюмінієві сплави (САС).

За здатністю до зміцнення термічною обробкою алюмінієві сплави поділяються на *зміцнювані термічною обробкою* та *незміцнювані термічною обробкою*.

*Деформівні алюмінієві сплави* класифікуються за двома системами, які в техніці використовуються паралельно: старою літерно-цифровою (ГОСТ 4784-97) та новою цифровою (ДСТУ 11069-01). Тому далі в тексті марки сплавів надані за обома системами, за винятком новостворених сплавів, яким тепер надається лише цифрове позначення.

За літерно-цифровою системою окремим групам сплавів присвоюється певна літера чи група літер, а сплави цієї групи розрізняються за номером, що стоїть біля літер. Наприклад, сплави системи Al-Cu-Mg (*дуралюміни*) позначаються літерою Д (Д1, Д16, Д18), сплави системи Al-Mg (*магналії*) – АМг (АМг1, АМг5).

За цифровою системою перша цифра 1 в усіх марках означає алюмінієвий сплав, друга цифра – систему сплаву (0 – технічний алюміній; 1 – система *Al-Cu-Mg*; 2 – *Al-Cu-Mn*; 3 – *Al-Mg-Si* та *Al-Mg-*

*Si-Cu*; 4 – *Al-Mn*; 5 – *Al-Mg*). Останні дві цифри – це порядковий номер сплаву. Наприклад, сплав 1520 – це алюмінієвий сплав системи *Al-Mg*, порядковий номер 20. У літерно-цифровому варіанті це сплав АМг2.

У марці деформівних сплавів умовними літерами позначають також стан сплаву: М – м'який, відпалений; Н – наклепаний; П – напівнаклепаний. Літерою Т з наступною цифрою позначають вид термічної обробки (Т1, Т2 тощо). Режими можна знайти у відповідних довідниках.

Ливарні сплави маркуються за ДСТУ 1583-93 літерою А (алюмінієвий сплав), за якою додають літери, що позначають легувальні елементи (К – кремній, М – мідь, Мг – магній, Н – нікель та ін.) та цифри, що показують середній вміст легувального елемента у відсотках. Відсутність цифри означає, що вміст елемента близько 1 %. Наприклад, АК9 (8-11 % *Si*), АК12М2 (11-13 % *Si*, 1,8-2,5 % *Cu*), АК12М2МгН (11-13 % *Si*, 1,5-3 % *Cu*, 0,8-1,3 % *Mg*, 0,8-1,3 % *Ni*).

У технічній документації на виробництві ще зберігається маркування алюмінієвих сплавів (за ГОСТ 2685-89. Сплавы алюминевые литейные) літерами АЛ, до яких додають умовні цифри. Наприклад, сплав марки АЛ19 за українським стандартом позначається АМ5.

**Деформівні алюмінієві сплави (ГОСТ 5784-97).** Розглянемо сплави, що зміцнюються термічною обробкою. Здатність будь-якого сплаву зміцнюватися термічною обробкою залежить від того, чи відбуваються в сплаві які-небудь перетворення у твердому стані. Якщо у твердому стані перетворень немає, такі сплави не піддаються зміцненню термічною обробкою; якщо ж у сплавах існує поліморфне перетворення або має місце зміна розчинності зі зниженням температури, такі сплави зміцнюються термічною обробкою.

Обмежену розчинність мають сплави системи *Al-Cu*. Які і є основними деформівними сплавами, що зміцнюються термічною обробкою. Найпоширенішими сплавами цієї групи є *дуралюміні*.

На рисунку 10.1 наведена діаграма стану сплавів цієї системи, яка дозволяє простежити за перетвореннями, що відбуваються в сплавах через зміну розчинності міді в алюмінії.

З діаграми видно, що розчинність міді в алюмінії змінюється від 5,7 % при температурі 548 °С до 0,5% при кімнатній температурі. Внаслідок зниження розчинності при повільному охолодженні з  $\alpha$ -твердого розчину виділяється фаза  $CuAl_2$ . Якщо ж сплав загартувати

від температури  $\sim 500^\circ\text{C}$ , можна зафіксувати твердий розчин міді в алюмінії, концентрація міді в якому визначається лінією обмеженої розчинності. При  $500^\circ\text{C}$  вона дорівнює  $\sim 4,6-5\%$ . Такий пересичений сплав не є рівноважним, тому в процесі витримки в пересиченому твердому розчині або утворюються дуже дрібні, густо розташовані зони, збагачені атомами міді, або з нього виділяються дисперсні частинки надлишкової фази, близької за складом до  $\text{CuAl}_2$ . Вони ефективно блокують рух дислокацій, забезпечуючи дисперсне зміцнення сплаву. Процес виділення надлишкових фаз при розпаді пересиченого твердого розчину називають *старінням*.

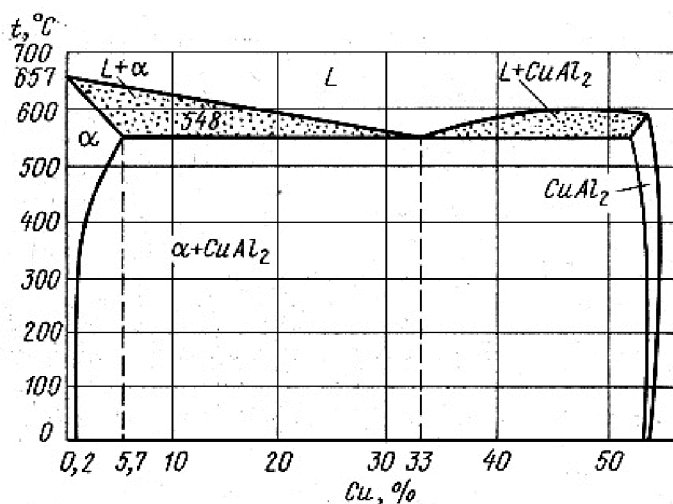


Рис. 10.1. Діаграма стану сплавів алюміній - мідь

Таким чином, *зміцнювальна термічна обробка алюмінієвих сплавів полягає в гартуванні з наступним старінням*. Залежно від температури старіння поділяється на природне та штучне. Природне відбувається при кімнатній температурі, загартований виріб витримують при цьому протягом кількох діб. Штучне проводять в температурному інтервалі  $150-200^\circ\text{C}$  протягом 10-20 годин.

В холодильній та криогенній техніці використовують термозміцнювані алюмінієві сплави, леговані міддю, магнієм, марганцем та іншими елементами. Міцність термозміцнюваних алюмінієвих сплавів наближається до міцності аустенітних сталей, і

тому в багатьох випадках вони могли б їх замінити. Їх недоліком є схильність до корозії під напруженням. Крім того, ці сплави розмінюються в зоні зварного шва.

Розглянемо властивості деяких алюмінієвих сплавів, які зміцнюються термічною обробкою.

*Дуралюміни* (рис. 10.2) характеризуються оптимальним поєднанням міцності та пластичності. Так, пресовані профілі з Д16 (1160) після термічної обробки Т1 (гартування та штучне старіння) при  $\sigma_{\text{с}} = 480$  МПа зберігають пластичність на рівні 12 %. З цього сплаву виготовляють силові елементи літаків (лонжерони, шпангоути), кузови вантажних автомобілів, будівельні конструкції, бурові труби тощо.

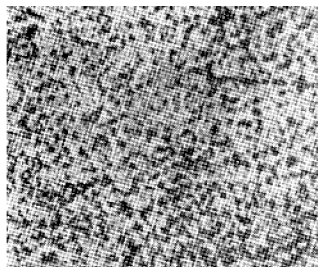


Рис. 10. 2. Структура дуралюміну після відпалювання

*Сплави підвищеної пластичності та корозійної стійкості системи Al-Mg-Si* зміцнюються гартуванням від 525 °С і старінням протягом 11 годин при 160 °С. Це такі сплави як АД31 (1310), АВ (1340) – авіаль. Сплав АД 31 з  $\sigma_{\text{с}} = 250$  МПа має вищу корозійну стійкість за міцний сплав АВ з  $\sigma_{\text{с}} = 380$  МПа. Тому його застосовують у будівництві, суднобудуванні, легкій та автомобільній промисловості для деталей помірної міцності, що працюють у вологій атмосфері, морській

воді. Сплав АВ використовують для деталей, технологія виготовлення яких вимагає високої здатності матеріалу до деформування (лопаті гвинтів вертольотів, штамповані деталі складної форми).

*Високоміцні сплави системи Al-Zn-Mg-Cu* після термічної обробки за режимами Т2 і Е3 (гартування та штучне старіння за спеціальними режимами, що забезпечують високі в'язкість руйнування та корозійну стійкість) добре поєднують високу міцність ( $\sigma_{\text{с}} = 550\text{-}650$  МПа) з пластичністю, в'язкістю руйнування та корозійною стійкістю. Сплави цієї системи В93, В95, В96 застосовують для важко навантажених конструкцій, що працюють переважно в умовах стискання (силові каркаси будівельних споруд, шпангоути, фюзеляжі літаків). Так, зі сплаву В83пч (пч – сплав підвищеної чистоти за вмістом домішок заліза і кремнію) виготовляють весь силовий каркас величезного літака АН-22 «Антей».

*Сплави з літієм* характеризуються низькою густиною ( $2,52 \text{ т/м}^3$ ) та високим модулем нормальної пружності. Наприклад, сплав 1420 системи *Al-Li-Mg* після гартування від  $450^\circ\text{C}$  та старіння при  $120\text{--}200^\circ\text{C}$  набуває такої ж міцності, як і сплав Д16, але він на 10-12 % легший за Д16, має вищі корозійну стійкість та модуль пружності. Заміна ним сплаву Д16 дозволяє зменшити масу виробів на 10-15 %. Сплави з літієм використовують як в авіабудуванні, так і в транспортному машинобудуванні.

*Сплави, що не зміцнюються термічною обробкою.* До них належать сплави систем *Al-Mg* та *Al-Mn*. Вони маркуються літерами АМц (з марганцем) та АМг (з магнієм); їх зміцнення забезпечується легуванням та наклепом.

Сплави АМц (1400) містять 1,0-1,6% *Mn*. Промисловість випускає напівфабрикати з них у м'якому відпаленому (АМцМ,  $\sigma_{\text{в}} \sim 130 \text{ МПа}$ ), напівнаклепаному (АМцП,  $\sigma_{\text{в}} \sim 180 \text{ МПа}$ ) та наклепаному (АМцН,  $\sigma_{\text{в}} \sim 220 \text{ МПа}$ ) станах.

Сплави системи *Al-Mg* називають *магналіями*. В марках цих сплавів після літер АМг додають цифри, які відповідають середньому вмісту магнію: АМг1 (0,7-1,6 %), АМг2 (1,8-2,6 %), АМг3 (3,2-3,8 %), АМг4 (3,8-4,8 %), АМг5 (4,8-5,8 %), АМг6 (5,8-6,8 %). За цифровою системою ці сплави відповідно позначаються марками 1510, 1520, 1530, 1550, 1540, 1560. Магналії теж випускаються м'якими, напівнаклепаними та наклепаними. Міцність сплавів суттєво підвищується зі збільшенням магнію чи ступеня наклепу.

Застосовувані термічно не зміцнювані сплави містять не більше 7 % магнію. З магналіїв як за кордоном, так і в СНД перевагу в машинобудуванні віддають сплаву АМг5.

Хоча міцність сплавів *Al-Mg* та *Al-Mn* нижча за міцність деформівних сплавів, що зміцнюються термічною обробкою, але вони мають високі пластичність та корозійну стійкість, легко оброблюються тиском, добре зварюються. Їх використовують для мало- та середньо навантажених деталей, які добре працюють в умовах високої вологості (обшивки кузовів, автоцистерни, бензинові баки, внутрішні перегородки літаків, суден, підводних човнів тощо).

*Ливарні алюмінієві сплави* (ГОСТ 2685-89, ДСТУ 1583-93). Важливою технологічною ознакою цих сплавів є добрі ливарні властивості: висока рідкотекучість, відносно мала усадка, незначна схильність до утворення гарячих тріщин, герметичність. Тому з них

відливають складні за формою фасонні виливки. Мала густина та здатність деяких сплавів зміцнюватися гартуванням і старінням забезпечує високу питому міцність, що у поєднанні з доброю корозійною стійкістю дозволяє використовувати їх для виготовлення навантажених литих деталей двигунів внутрішнього згоряння, компресорів тощо.

Відомо, що кращі ливарні властивості мають сплави, близькі за складом до евтектичних. Проте, присутність у структурі цих сплавів крихкої евтектики погіршує механічні властивості, насамперед ударну в'язкість. З іншого боку, відсутність чи незначна кількість евтектики погіршує ливарні властивості сплаву і це проявляється у зниженні якості великих різностінних фасонних виливків. Для ослаблення негативного впливу цих чинників у технологічному процесі виготовлення виливків передбачають: рафінування сплаву для видалення з нього поглинутих газів (особливо, водню), неметалевих включень; модифікування розплаву з метою подрібнення крихких фаз евтектики; вибір оптимального способу лиття; проведення зміцнювальної термічної обробки.

Ливарні алюмінієві сплави переважно багатокомпонентні з великим вмістом (5-25 %) легуючих елементів, головним чином *Si*, *Cu*, *Mg*, *Mn*, *Ti* у різних композиціях. До них належать сплави систем *Al-Si*; *Al-Cu*; *Al-Mg*; *Al-Cu-Si* та ін. Залежно від легування, ливарні сплави можуть бути такими, що зміцнюються та що не зміцнюються термічною обробкою.

*Сплави системи Al-Si* називають *силумінами* (рис. 10.3). Це поширені ливарні сплави з вмістом кремнію від 4 до 25 %. Класичним силуміном є подвійний сплав АК12 (АЛ2) евтектичного складу (10-13 % *Si*). Силуміни подібного складу мають низьку міцність ( $\sigma_s = 160-250$  МПа), доволі крихкі через присутність в структурі грубих пластинчастих кристалів кремнію. Можливими способами поліпшення механічних властивостей цих сплавів є подрібнення структури за рахунок швидкого охолодження під час кристалізації виливків і модифікування титаном, церієм, берилієм, натрієм та іншими модифікаторами.

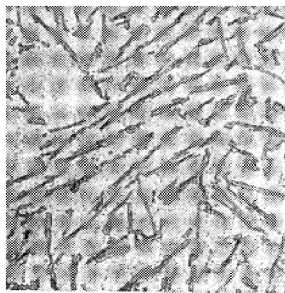


Рис. 10. 3. Структура силуміну

Багатокомпонентні силуміни з міддю, магнієм (АК9М4) можуть зміцнюватися гартуванням і старінням. Проте, мідь погіршує корозійну стійкість, що можна компенсувати легуванням нікелем (АК12М2МгН). Марганець протидіє окрихчувальному впливу домішок заліза. Силуміни застосовують для виготовлення відповідальних литих деталей: картерів, блоків та головок циліндрів двигунів внутрішнього згоряння, корпусів компресорів та насосів, гальмівних барабанів, поршнів двигунів.

*Сплави системи Al-Si* зміцнюються гартуванням і старінням. Через відсутність евтектики в структурі сплавів вони мають гірші ливарні властивості. Легування титаном і марганцем покращує ливарні та механічні властивості. Сплави добре зварюються, оброблюються різанням, жароміцні до 300 °С. З них відливають малі за розмірами відповідальні деталі, які працюють при середніх статистичних та динамічних навантаженнях до температур 200-300 °С. Для підвищення корозійної стійкості деталі анодують.

*Сплави системи Al-Mg* мають найменшу густину, найвищу корозійну стійкість в атмосфері, морській воді та агресивних середовищах порівняно з іншими ливарними алюмінієвими сплавами. Вони зміцнюються модифікуванням титаном, церієм та гартуванням. Старіння окричує та погіршує опір корозії, тому не застосовується після гартування сплавів. Недоліком сплавів є низькі ливарні властивості (з-за відсутності евтектики в структурі) та жароміцність (до 80 °С). Добре поєднання міцності та пластичності мають сплави АМг10, АМг11:  $\sigma_s = 360$  МПа,  $\delta = 10-18$  %. З них виготовляють навантажені деталі, що працюють в різних кліматичних умовах від – 60 до 70 °С.

Після цифр у ливарному сплаві також може стояти літера «В», це означає, що використовується вторинний сплав, отриманий з металобрухту (наприклад, АЛ17В). Якщо в позначення алюмінієвого сплаву додана літера «П», це означає, що сплав достатньо безпечний та може використовуватися для виготовлення виробів, що контактують з їжею.

Хімічний склад та властивості ливарних алюмінієвих сплавів показані в таблиці 10.1. У цій таблиці види термічної обробки (ТО) позначають: Т4 – гартування; Т5 – гартування та часткове старіння; Т6 – гартування та повне старіння до максимальної твердості. Види лиття позначені літерами: З – земля; О – оболонкові форми; В –



виплавлювані моделі; К – лиття в кокіль; Д – лиття під тиском; М – сплав при литті модифікується.

Таблиця 10.1. Хімічний склад та властивості литих алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, % мас.				Спо-сіб лиття	Вид ТО	Механічні властивості		
	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	Інші			$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	HB
АЛ1	-	3,75-4,5	1,25-1,75	1,75-2,2 Ni	З,О,В,К	Т5	210	0,5	95
АЛ2	10-13	-	-	-	З	-	180	6	50
АЛ4	0,5-8,0	-	0,17-0,30	0,2-0,5 Mn	З,О,В,К,Д	Т6	150-230	2-3	50-70
АЛ6	4,5-6,0	2,0-3,0	-	-	З	Т6	240	4	80
АЛ7	-	4-5	-	-	З	Т6	280	2	95
АЛ8	-	-	9,3-10	-	З,О,В,К	Т4	300	15	75
АЛ9	6,0-8,0	-	0,2-0,4	-	З,О,В,К	Т6	160-230	1-2	50-70
АЛ12	-	9-11	-	-	З	Т6	200	1	70
АЛ19	-	4,5-5,3	-	0,6-1,0 Mn 0,15-0,3 Ti	З,О,В,К (М)	Т4	300	8	70
						Т5	400	4	90
АЛ27	-	-	9,5-10,5	0,05-0,15 Ti 0,05-0,2 Zr 0,05-0,2 Be	З,О,К,Д (М)	Т4	300	15	75

## 10.2 Сплави на основі міді

Сплави на основі міді поділяються на дві групи – латуні та бронзи. *Латуні* – це подвійні або багатоконпонентні сплави, в яких цинк є основним легуючим компонентом. *Бронзи* – сплави міді з усіма іншими елементами, в які цинк може входити як додатковий легуючий компонент.

*Латуні.* Залежно від вмісту цинку латуні поділяються на однофазні ( $\alpha$ -латунь,  $Zn < 39\%$ ) та двофазні ( $\alpha+\beta$ -латунь,  $Zn 39-45\%$ ). Тут  $\alpha$  – це твердий розчин цинку в міді,  $\beta$  – тверда та крихка сполука  $CuZn$  (рис. 10. 4). З підвищенням кількості цинку в однофазних латунях одночасно збільшуються міцність і пластичність (рис. 10.5).

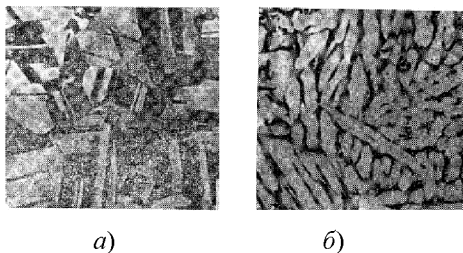


Рис. 10.4. Структури латуней  
а)  $\alpha$  – латунь; б)  $\alpha + \beta$  – латунь

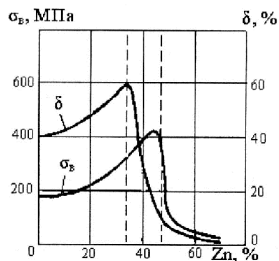


Рис. 10.5. Вплив цинку на властивості латуні

При переході до двофазних латуней міцність залишається високою, але пластичність різко знижується через присутність крихкої  $\beta$ -фази. Подальше збільшення кількості цинку призводить до різкого зниження міцності. Тому, як правило, кількість цинку в промислових латунях не перебільшує 45 %.

За хімічним складом латуні поділяються на *подвійні*, або *прості*, які містять тільки мідь та цинк, та *складні*, або *леговані*, в яких присутні інші елементи, які додають для одержання спеціальних властивостей. Тому багато компонентні латуні часто називають спеціальними. Так, свинець покращує оброблюваність різанням, і латунь, леговану свинцем, називають автоматною; олово підвищує корозійну стійкість, і латунь, леговану оловом, називають морською.

За технологічною ознакою, тобто за способом виготовлення виробів, латуні поділяються на *деформівні* та *ливарні*.

**Маркування латуней.** Латуні маркують літерою Л. В простих латунях після літери наведена кількість основного компонента – міді, а решта – цинк, наприклад, Л90, що означає латунь з вмістом міді 90 % і цинку 10 %. В складних латунях. Як і у всіх кольорових сплавах, легуючі елементи позначають такими літерами: А – алюміній, Б – берилій, Ж – залізо, К – кремній, М<sub>ц</sub> – марганець, М<sub>г</sub> – магній, Н – нікель, О – олово, С – свинець, Т – титан, Ф – фосфор, Х – хром, Ц – цинк. Кількість елемента вказана цифрами, які відповідають його вмісту у відсотках. Інколи при вмісті легувального елемента менше 1,5 % цифра не ставиться.

Маркування складних деформівних та ливарних латуней відрізняється. В деформівних латунях після Л ставиться літера, що

характеризує легуючий елемент, а потім йдуть цифри, з яких перша позначає кількість міді, решта – цинк. Наприклад, ЛС59-1 (59 % міді, 1 % свинцю, решта 40 % – цинку). В ливарних латунях після Л ставиться літера Ц та цифра, що позначає кількість цинку, а далі літери та цифри, що відносяться до легуючих елементів: ЛЦ40МцЗЖ (40 % цинку, 3 % марганцю, менше 1,5 % заліза, решта – мідь).

*Деформівні латуні* (ГОСТ 15527-2004). До них належать однофазні латуні. Вони мають високі характеристики пластичності, добре оброблюються тиском в гарячому та холодному стані, добре зварюються та паяються. Ці латуні сильно зміцнюються холодною пластичною деформацією. Двофазні латуні крихкі та можуть деформуватися тільки в гарячому стані.

В транспортному машинобудуванні використовують прості та складні деформівні латуні. Під впливом деформації в цих латунях значно змінюються механічні характеристики, тому до марки латуні можуть додаватися літери: М (м'яка, в якій наклеп був знятий рекристалізаційним відпалом) та Т (тверда, яка поставляється в наклепаному стані). З деформівних латуней виготовляють прутки, стрічки, дріт, труби. Їх використовують для трубок радіаторів, паливопровідних, конденсаторних та манометричних трубок, бачків радіаторів, поплавків карбюраторів, шестерень, деталей приладів електрообладнання тощо.

*Ливарні латуні* (ГОСТ 17711-93). Ливарні латуні, як правило, деформації не піддають. Деталі з них виготовляють литтям у піщані або металеві форми. Ливарні латуні мають добру рідкотекучість, малу схильність до ліквації, добрі антифрикційні властивості. З них виготовляють:

- ЛС59-1Л – втулки, арматура, фасонне литво;
- ЛС63-3 – антифрикційні деталі, підшипники, втулки;
- ЛМцЖ55-3-1 – теплообмінна апаратура, яка працює при 300°C;
- ЛА67-2,5 – корозійностійкі деталі;
- ЛАЖ60-1-1 – черв'ячні гвинти, що працюють у важких умовах.

**Бронзи.** Залежно від легуючого елемента бронзи поділяються на олов'яні, свинцеві, кремнієві, берилієві. Вони можуть бути *деформівними та ливарними*.

За призначенням вони поділяються на конструкційні та антифрикційні. Бронзи, як і латуні, можуть бути простими (подвійними) та складними (спеціальними).

**Маркування бронз.** Бронзи позначають літерами Бр, наступні літери вказують легувальні елементи, що входять до бронзи, а цифри – їх кількість у відсотках, решта – вміст міді. В деформівних бронзах (ГОСТ 5017-2006) спочатку пишуть літери, потім цифри в порядку, що відповідає легувальним елементам: БрОЦ4-3 (4 % олова, 3 % цинку, 93 % міді). У ливарних бронзах (ГОСТ 613-79) кількість легуючого елемента у відсотках вказується безпосередньо після літери: БрА10ЖЗМц2 (10 % алюмінію, 3 % заліза, 2 % марганцю, решта - мідь). Залежно від того, чи містить бронза олово, бронзи поділяють на дві групи – олов'янисті та безолов'янисті.

Ливарні олов'янисті бронзи (рис. 10.6) мають добрі ливарні властивості (високу рідкотекучість, малу лінійну усадку), тому їх використовують для виготовлення деталей складної форми. З

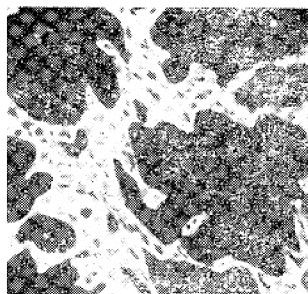


Рис. 10. 6. Структура олов'янистої бронзи

підвищенням кількості олова міцність бронзи зростає, але при вмісті  $Sn$  більше 6 % пластичність різко знижується та при 15-20 % олова наближається до нуля, тому на практиці вміст олова зазвичай обмежують (до 10-12 %).

Прості олов'янисті бронзи застосовують, головним чином, як антифрикційні матеріали (БрО6, БрО10). Легуючі елементи надають бронзам спеціальних властивостей. Так, свинець покращує оброблюваність різанням та антифрикційні властивості, підвищує щільність виливків. Фосфор покращує ливарні властивості. Цинк позитивно впливає на деякі технологічні властивості та здешевлює бронзу. Найсуттєвішою перевагою олов'янистої бронзи є висока втомна міцність в корозійних середовищах.

Деформівні олов'янисті бронзи, як правило, містять 4-6 % олова та інші елементи, наприклад, БрОФ4-0,25, БрОЦС4-4-2,5. Вони добре зварюються та паяються, постачаються у вигляді прутків, труб, стрічок, дроту у твердому (нагартваному) та м'якому (відпаленому) станах, що позначається буквами М – м'який, Т – твердий.

Виготовляють пружини, опорні шайби, шестірні та ін. Олов'яністі бронзи в морській воді стійкіші, ніж мідь та латунь.

*Безолов'яністі бронзи* зазвичай багатокомпонентні. Основними елементами в них є алюміній, залізо, нікель. Безолов'яністі бронзи можуть бути ливарними та деформівними. За призначенням це конструкційні бронзи, які характеризуються високою міцністю, корозійною стійкістю та використовуються для виготовлення деталей, що працюють у важких умовах (великі навантаження, морська вода, тропічна атмосфера тощо). Найпоширенішими серед бронз цього виду є *алюмінієві* та *кремнієві* бронзи, наприклад, БрА10Ж3Мц2 (ливарна алюмінієва бронза), БрАЖ9-4 (деформівна алюмінієва бронза), БрКМц5-1 (кремнієва деформівна бронза). Їх використовують для зубчастих коліс потужних кранів, черв'ячних коліс, які працюють у парі зі сталевими черв'яками та ін.

*Свинцеві бронзи*. Серед них найпоширенішою є БрС30. Свинець практично не розчиняється в міді та кристалізується у вигляді окремих зерен. Свинцеві бронзи використовуються як антифрикційні матеріали у підшипниках ковзання, що працюють в умовах підвищеного тиску та великих швидкостей руху. Легування нікелем та оловом покращує механічні властивості та корозійну стійкість. Окремо слід зупинитися на берилієвих бронзах (БрБ2, БрБНТ1,9). Ці бронзи належать до сплавів, що зміцнюються термічною обробкою. Після гартування та старіння вони мають високі значення тимчасового опору (до 1300-1370 МПа) та високу пружність (границю текучості) –  $\sim 1250$  МПа при  $\delta \sim 2-4$  %. Їх використовують для мембран, пружин, пружинних контактів і т. ін.

*Мельхіор* – сплав міді з нікелем (МН19). В цьому сплаві міститься 18-20 % нікелю, решта – мідь. Білий, блискучий, який не окислюється на повітрі та в органічних лугах, який називають за свій вигляд китайським сріблом. Його використовують для виготовлення столових приборів.

*Нейзільбер* – сплав, який містить 13,5-16,5% Ni, 18-22% Zn, решта – мідь. Марка МНЦ15-20. Його ще називають нове срібло, бо він має сріблястий колір з синім відливом.

Узагальнені дані для мідних сплавів наведені у таблиці 10.2. У цій таблиці надані тільки мінімальні та максимальні значення без посилання на конкретну марку латуней чи бронз.

Таблиця 10.2. Механічні властивості латуней та бронз

Матеріал	Латунь		Бронза	
	деформівна	ливарна	деформівна	ливарна
$\sigma_B$ , МПа	400 – 450 (650 – 750)	390 – 490 (215 – 440)	330 – 400 (550 – 750)	150 – 200 (150 – 170)
$\delta$ , %	45 – 50 (6 – 10)	20 – 12 (18 – 12)	35 – 65 (2 – 10)	5 – 12 (5 – 8)

Примітка: для деформівних сплавів цифри без дужок характеризують механічні властивості у відпаленому, в дужках – у наклепаному стані. Для ливарних сплавів у дужках вказані властивості при литті в піщано-глинисту форму, без дужок – у кокіль.

### 10.3 Антифрикційні матеріали

*Антифрикційні матеріали* використовують у вузлах тертя, до яких належать підшипники, під'ятники, шарнірні пристрої тощо. Вони забезпечують малі втрати енергії при роботі пар тертя.

Найважливішою властивістю антифрикційних сплавів є низький коефіцієнт тертя в парі з контртілом. Крім цього, до антифрикційних матеріалів ставлять такі вимоги:

- здатність утримувати мастило;
- добра припрацьовуваність, тобто здатність до швидкого збільшення реальної площі контакту у початковий період роботи пари;
- мала зношуваність поверхонь, що труться;
- підвищений опір заїданню та утворенню задирок;
- достатня міцність, необхідна для стабільної роботи підшипника при високих питомих тисках, яка має поєднуватися з певним рівнем пластичності для забезпечення припрацьовуваності;
- висока контактна витривалість для запобігання викрашуванню матеріалу з поверхні сплаву;
- добра теплопровідність для відведення тепла, яке виділяється у вузлі тертя. Це сприяє збереженню рівня міцності й особливо втомної міцності;
- висока корозійна стійкість та добрі технологічні властивості.

Можна виділити такі основні види металевих антифрикційних матеріалів: бабіти, сплави на основі міді (бронзи та латуні), алюмінієві підшипникові матеріали, цинкові антифрикційні матеріали, антифрикційні чавуни, порошкові антифрикційні матеріали.

**Бабіти** – це легкоплавкі сплави на основі олова (олов'яністі бабіти) та свинцю (свинцевисті бабіти). Ці сплави недостатньо міцні, тому зазвичай вони наносяться тонким шаром на міцнішу основу (частіше сталеву).

Бабіти маркують літерою Б. В олов'яних бабітах за літерою наведені цифри, що вказують середню кількість олова у відсотках (Б83, Б89). Крім олова, яке є основою сплаву, ці бабіти містять сурму (7-12 % залежно від марки) та мідь (2,5-6,5 % залежно від марки).

У свинцевих бабітах основу складає свинець, крім якого сплави містять певну кількість олова, сурми та міді. Вони також маркуються літерою Б, після якої пишуть літери, що позначають легувальний елемент, та цифри, які вказують кількість даного елемента у відсотках. До свинцевих бабітів належать марки Б16, БС6, БТ, БК. Бабіт Б16 містить ~ 16 %  $Sn$ , ~ 2 %  $Cu$ , решта  $Pb$  (тут олово літерою не позначене). Бабіт БС6 містить ~ 6 %  $Sn$ , ~ 5,5 %  $Sb$ , 0,5 %  $Cu$ . Цей бабіт ще відомий під маркою СОС6-6. У бабіт БТ, крім олова, сурми та міді додають 0,1 % телуру. Бабіт БК, крім свинцю, містить біля 1 % кальцію та натрію. Структури бабітів наведені на рис. 10.7.

Для забезпечення низького коефіцієнта тертя створюється структура з чергуванням дрібних кристалів твердих хімічних сполук ( $SnSb$ ,  $Cu_3Sn$ ), які рівномірно розташовані в м'якій матриці свинцю чи олова.

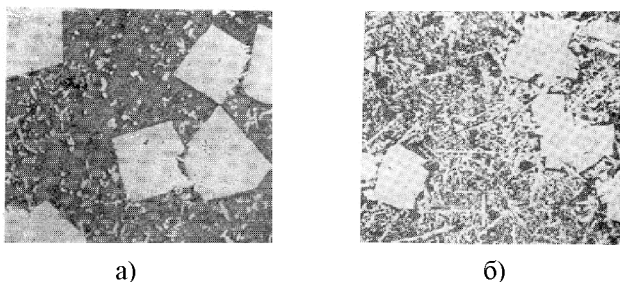


Рис. 10. 7. Структури бабітів  
а) олов'яністого; б) свинцевого

Бабіти мають низьку твердість (15-30 НВ), низьку температуру плавлення (240 – 320 °С), високі антифрикційні властивості, добре припрацьовуються. Недоліком бабітів є їх висока вартість та низька контактна витривалість, особливо у олов'яних бабітів. Тому такі сплави не використовують для швидкохідних машин.

Справа в тому, що товщина шару бабіту впливає на втомну міцність: чим тонший шар, тим вищий опір втомному руйнуванню. Зменшення товщини шару з 0,75 до 0,075 мм підвищує термін експлуатації підшипника в 4,5 рази. У біметалевих вкладних товщина шару бабіту змінюється від кількох міліметрів до 0,2 міліметрів. Подальше зменшення товщини шару неможливе, оскільки збільшується ймовірність його швидкого стирання.

Таке зменшення шару вдалося досягти у три металевих вкладних, в яких між сталеву основу та антифрикційним шаром наносять шпаристий прошарок з міді та нікелю. При заливанні рідкий бабіт затікає в пори прошарку, що забезпечує його добре зчеплення з основою. Це дозволяє зменшити товщину шару та тим самим покращити службові властивості вкладнів.

**Бронзи та латуні.** Бронзи мають вищу міцність, ніж бабіти, тому їх використовують для важконавантажених підшипників, які працюють під великим питомим тиском та при високих швидкостях ковзання. Зокрема, бронзові вкладні використовуються в авіабудуванні.

Найкращі антифрикційні властивості мають олов'яні бронзи, які завдяки низькому коефіцієнту тертя можуть використовуватися, не викликаючи заїдання навіть за умови обмеженого змащування, до того ж мають добрі технологічні властивості. Для їх здешевлення олово частково замінюють цинком, а для поліпшення антифрикційних характеристик додають свинець. У швидкохідних двигунах широко використовують свинцеву бронзу БС30, яка має переваги перед іншими антифрикційними сплавами: вищі границя витривалості, теплопровідність, але технологічність цієї бронзи гірша, оскільки при її кристалізації має місце ліквідація свинцю.

У деяких випадках як антифрикційні можуть використовуватися й латуні, наприклад, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ16К4, хоча антифрикційні властивості їх гірші.

**Алюмінієві матеріали.** Ці сплави мають високу втомну міцність, добру технологічність, теплопровідність, високу корозійну



стійкість у мастилах. Їх наносять на сталеву основу у вигляді стрічки, а зчеплення шарів досягається сумісним прокатуванням. Структура таких сплавів складається з м'якої основи (алюмінію), в якій розташовані частинки твердих хімічних сполук ( $AlSb$ ,  $Cu_3Sn$ ).

Недоліком цих сплавів є відносно низькі антифрикційні властивості, недостатня припрацьовуваність, низька здатність поглинати абразивні частинки, що містяться у мастилі. При роботі в парі з вкладнем з алюмінієвого сплаву вали більше зношуються та мають вищу схильність до утворення задирок. Для покращення припрацьовуваності такі сплави покривають тонким шаром (до 20 мкм) олова або сплавами олова та свинцю. Такі сплави використовуються у дизелебудуванні.

Сплави цієї групи маркують буквою А (алюміній), а далі вказують елементи, які додають у сплав (С – сурма, М – магній, О – олово), та іноді цифри, що відповідають їх середньому вмісту у відсотках. Прикладами цих сплавів є АСМ (3,5 – 6,5 % сурми, 0,3 – 0,7 % магнію, решта – алюміній), АО9-2 (9 % олова, 2 % міді, решта – алюміній) та ін.

**Цинкові антифрикційні матеріали.** До цинкових антифрикційних матеріалів належать сплави системи  $Zn-Al-Cu$ , де цинк є основою сплаву. Вони маркуються ЦАМ з додаванням цифр, що відповідають середній кількості елемента у відсотках, наприклад, ЦАМ 10-5 (~ 10 %  $Al$ , 5 %  $Cu$ ), ЦАМ 4-1 (~ 4 %  $Al$ , 1 %  $Cu$ ). Всі цинкові сплави додатково містять ~ 0,03-0,08 %  $Mg$ .

Цинкові сплави дещо поступаються свинцевим та олов'яним бабітам за своїми антифрикційними властивостями, але вони міцніші за бабити та дешевші. Порівняно з алюмінієвими сплавами вони краще припрацьовуються, менше зношують шийки вала, дуже технологічні. Але при роботі в парі зі сталлю вони схильні до заїдання. Тому вкладні з цинкових сплавів мають виготовлятися з високою точністю, а в процесі експлуатації необхідне інтенсивне змащування. За таких умов цинкові сплави є повноцінними заміниками олов'яних бронз та безолов'яних бабітів. Їх використовують у підйомно-транспортних машинах, металорізальних верстатах, пресах, прокатних станах, дизелях, якщо питомий тиск не перевищує 20 МПа, а колова швидкість – 3 м/с. Їх використовують або як монометалевий вкладень, або як біметалевий, наносячи цинковий сплав на сталеву стрічку.

*Антифрикційні чавуни.* Як антифрикційні використовують сірі, ковкі, високоміцні чавуни. Графіт відіграє роль м'якої складової, яка ще й утримує мастило. Металева основа антифрикційного чавуну має бути перлітною або феритно-перлітною з кількістю графіту не більше 15 %.

Чавуни – це дешеві матеріали, які можуть витримувати значний питомий тиск, але вони чутливі до чистоти обробки спряженої поверхні і в умовах недостатнього змащування погано припрацьовуються. Тому їх використовують для вузлів з низькою швидкістю ковзання.

Вони маркуються АЧС, АЧК та АЧВ (антифрикційний чавун сірий, ковкий та високоміцний відповідно, ГОСТ 1585-85). Після літер додають умовні цифри, що відповідають різному легуванню чавунів, наприклад, АЧС-1, АЧС-4, АЧВ-2, АЧК-1.

*Порошкові антифрикційні матеріали.* Ці сплави виготовляють на основі порошків заліза, міді, бронзи з додаванням графіту за технологією порошкової металургії – пресування з наступним спіканням. Найчастіше використовують композиції залізо-графіт або залізо-мідь-графіт, з яких виготовляють втулки або кільця підшипників.

У сплави на основі порошків заліза графіт додають у кількості 1-3 % (марки ЖГр2, ЖГр3, в яких цифра відповідає відсотку графіту). Шпаристість у таких сплавах досягає 15-25 %. Після спікання сплави просочують оливою (занурюють у гарячу оливу та витримують протягом 1-2 годин). Олива проникає у пори та частково поглинається графітом. При подальшій роботі під впливом розігріву вузла пори стискаються, витісняючи оливу, яка утворює суцільну плівку. Після закінчення роботи вузол охолоджується й пори знову всмоктують оливу. Таким чином, підшипник стає самозмащувальним. Такі підшипники використовуються у місцях, де змащування утруднене або неприпустиме (наприклад, у текстильній чи харчовій промисловості). До таких сплавів для зменшення коефіцієнта тертя додають дисульфід молібдену, сульфід цинку та інші тверді мастильні матеріали.

Такі матеріали мають знижені механічні властивості через значну шпаристість та можуть використовуватися при невеликих швидкостях ковзання й при відсутності ударних навантажень. Додавання в залізо-графітову суміш невеликої кількості міді покращує

властивості антифрикційних порошкових матеріалів. Розплавляючись при спіканні, мідь заповнює пори, що приводить до підвищення механічних властивостей. Прикладом такого матеріалу є сплав ЖГр2Д2,5 (2,5 %  $Cu$ ), який використовують для поршневих кілець.

Зносостійкість підшипників із залізграфітового матеріалу у кілька разів вища, ніж у бронз та бабітів. До того ж вони можуть працювати без змащування до температури 250 – 400 °С. Бронзографітові матеріали використовують у вузлах, що працюють в умовах слабо агресивного або вологого середовища. Підшипники ковзання можуть виготовлятися одно-, дво- та триметалевими. Загальна конструкційна міцність вкладнів зумовлюється насамперед властивостями сталевोї основи. При цьому чим тонший шар антифрикційного матеріалу, тим вища контактна витривалість і несуча здатність підшипника.

#### 10.4 Сплави на основі титану

**Властивості титану.** Титан – метал, за зовнішнім виглядом схожий на сталь. Завдяки своїм унікальним властивостям елемент названий так на честь титанів у грецькій міфології – могутніх дітей Урану (Неба) та Геї (Землі).

Це легкий, тугоплавкий, міцний та пластичний метал, з температурою плавлення 1665 °С та гексагональним типом кристалічної ґратки. Важливими властивостями титану є його мала густина – 4,5 г/см<sup>3</sup>, висока корозійна стійкість в морській воді, деяких кислотах та інших агресивних середовищах.

Висока корозійна та хімічна стійкість обумовлені утворенням міцної та щільної плівки оксиду  $TiO_2$  на поверхні в умовах атмосфери, ця плівка забезпечує високий опір корозії більш ніж у 130 агресивних середовищах. Завдяки малій густині титан має високу питому міцність, що дозволяє значно зменшити масу виробів. Ця особливість титанових сплавів широко використовується в авіаційній, космічній, а в останній час – в автомобільній промисловості. Висока корозійна стійкість сплавів титану дозволяє виготовляти з них корпуси підводних човнів. Крім того, ці сплави можуть зміцнюватись термічною обробкою. Титан знаходить дуже широке застосування в медичній практиці як у нас в країні, так і за кордоном,

використовується для виготовлення хірургічних імплантів, фіксаторів, протезів тощо.

Технічний титан маркується літерами ВТ (вакуумний титан) та умовними цифрами: ВТ1-0 (сумарний вміст домішок  $\leq 0,55$  %), ВТ1-00 (сумарний вміст домішок  $\leq 0,40$  %). З підвищенням вмісту домішок міцність таких сплавів зростає, а пластичність та в'язкість знижується.

При нагріванні титан активно поглинає гази (водень, кисень, азот, які є дуже шкідливими домішками). Тому термічну обробку титану та його сплавів виконують у вакуумі або інертних газах.

**Маркування та класифікація титанових сплавів.** У промисловості набагато ширше за технічний титан використовують титанові сплави. Сплави титану маркуються літерами ВТ, за ними йдуть цифри, перша з них – середня кількість алюмінію у відсотках. Практично всі титанові сплави містять алюміній, який зменшує густину сплаву та покращує властивості як при кімнатній температурі, так і при нагріванні. Інші цифри є умовними: ВТ5 (~5 % Al), ВТ5-1 (~5 % Al, 2,5 % Sn). Для деяких сплавів і перша цифра не відповідає кількості Al, наприклад, ВТ14 (~5,5 % Al, 1,3 % V, 3 % Mn). У ливарних сплавах до марки в кінці додається літера Л (ВТ6Л).

Для підвищення механічних властивостей титану в нього вводять легуючі елементи: алюміній, хром, марганець, молібден, залізо, олово, ванадій та ін. Легуючі елементи можуть утворювати з титаном: тверді розчини заміщення, інтерметалідні фази, карбіди, а при охолодженні в твердому стані в сплавах може протікати евтектоїдне перетворення.

Титанові сплави класифікують за: *технологією виготовлення* (деформівні, ливарні, порошкові); *здатністю зміцнюватися термічною обробкою* (зміцнювані та незміцнювані); *механічними властивостями* (сплави нормальної міцності, високоміцні, жароміцні, високопластичні); *структурою в рівноважному стані після відпалу або після гартування*.

У відпаленому стані сплави поділяються на однофазні (зі структурою  $\alpha$ - або  $\beta$ -твердого розчину) та двофазні (з  $\alpha+\beta$ -структурою). Сплави  $\alpha+\beta$  мають більш високі механічні властивості, ніж однорідні  $\alpha$ -сплави, добре куються та штампуються і тому знаходять широке застосування в техніці. Термічною обробкою зміцнюються двофазні сплави. Титанові сплави піддають таким видам ТО: ре-

кристалізаційному відпалу; відпалу з фазовою перекристалізацією; гартуванню з наступним старінням; азотуванню.

На рисунку 10.8 наведені мікроструктури титанових сплавів після нагрівання та повільного і швидкого охолодження.

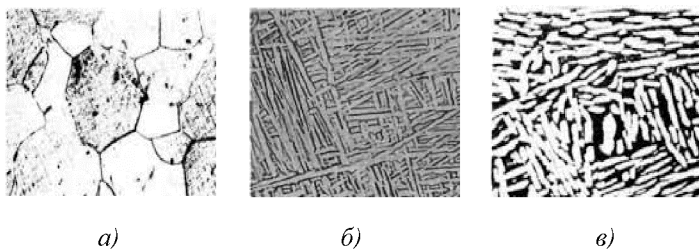


Рис. 10.8. Мікроструктури сплавів титану,  $\times 400$ :  
 $\alpha$  –  $\alpha$ -твердий розчин (сплав ВТ-1); б –  $\alpha$ -фаза (мартенсит гартування сплаву ВТ-1 від  $1075^{\circ}\text{C}$ ); в –  $\alpha + \beta$  – твердий розчин (сплав ОТ-4)

Хімічний склад і властивості  $\alpha$  та  $\alpha + \beta$  титанових сплавів наведені в таблиці 10.3.

Таблиця 10.3. Хімічний склад і властивості  $\alpha$  та  $\alpha + \beta$  титанових сплавів

Марка сплаву	Тип структури	Вміст елементів, мас. час. %					$\sigma_{\text{в}}$ МПа	$\sigma_{\text{м}}$ МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$K_{\text{SU}}$ , МДж/м <sup>2</sup>
		Al	Cr	Mn	Mo	V					
BT5	$\alpha$	4,0-5,5	–	–	–	–	800-950	700-850	12-25	30-45	0,3-0,6
BT3	$\alpha + \beta$	4,0-6,2	2-3	–	–	–	950-1150	850-1050	10-16	25-40	0,3-0,6
BT3-1	$\alpha + \beta$	4,0-6,2	1,5-2,5	–	1,0-2,8	–	950-1200	850-1100	10-16	25-40	0,3-0,6
BT4	$\alpha + \beta$	4,0-50	–	1,0-2,0	–	–	800-900	700-800	15-22	20-30	–
BT6	$\alpha + \beta$	5,0-6,5	–	–	–	3,5-4,5	900-1000	800-900	8-13	30-45	0,4-0,8
BT8	$\alpha + \beta$	5,8-6,8	0,6-1,2	–	2,8-3,8	–	1050-1180	950-1100	9-15	30-55	0,3-0,6

***Використання промислових титанових сплавів.*** Деформівні сплави випускаються у вигляді поковок, штамповок, листів, стрічок, дроту, смуг, труб. До деформівних сплавів належать однофазні  $\alpha$ -сплави та двофазні  $\alpha+\beta$ -сплави. З однофазних найпоширенішим є ВТ-5. Обробкою тиском з нього виготовляють різноманітні напівфабрикати (прутки, труби, дріт) та деталі, що експлуатуються від криогенних температур до 500 °С. Сплави цієї групи добре зварюються різними способами зварювання та задовільно оброблюються різанням. Після пластичної деформації сплави сильно наклепується. Однофазні сплави не зміцнюються термічною обробкою.

Властивості двофазних сплавів залежать від кількості  $\beta$ -фази. При малому її вмісті (до 5%) покращується пластичність, що дозволяє оброблювати сплави тиском у холодному стані (сплави ОТ4-0, ОТ4-1 з вмістом алюмінію до 2,5 %). З підвищенням вмісту *Al* (ОТ4-2) або при легуванні церієм (ВТ20) зменшується пластичність, але збільшується міцність і особливо жароміцність. Недоліком цих сплавів є значна схильність до водневої крихкості, сплави цієї групи практично не зміцнюються термічною обробкою.

Двофазні сплави (від 5 до 50 %  $\beta$ -фази) мають вищу питому міцність, яка поєднується з доброю пластичністю та здатністю зміцнюватися термічною обробкою (гартуванням з наступним старінням). Ефект зміцнення зростає зі збільшенням легувальних елементів. Прикладами таких сплавів є ВТ6, ВТ3-1, ВТ14, ВТ16. Сплав ВТ22 (~ по 5 % *Al*, *Mo*, *V* та по 1 % *Cr* і *Fe*) завдяки більшому вмісту в структурі  $\beta$ -фази навіть після відпалу має міцність, сумірну з міцністю деяких сплавів у термозміцненому стані. Так як зміцнювальна термічна обробка внаслідок низької прогартуваності титанових сплавів є малоефективною для крупногабаритних виробів, при їх виробництві перевагу надають сплавам цього складу після відпалу.

Двофазні сплави мають високу пластичність як після відпалу, так і після гартування. Після старіння їх пластичність дещо знижується, але при цьому зростають міцність та жароміцність. Вони краще за  $\alpha$ -сплави деформуються тиском, менше схильні до водневої крихкості, задовільно оброблюються різанням та зварюються. Після зварювання необхідно проводити відпал для збільшення пластичності зварного шва.

*Ливарні сплави.* До них належать  $\alpha + \beta$ -сплави (BT1Л, BT4Л, BT6, BT14Л), за хімічним складом близькі до деформівних, а також деякі спеціальні сплави для фасонного лиття. Ці сплави мають добрі ливарні властивості (невелику усадку, високу рідкотекучість, малу схильність до утворення гарячих тріщин). Механічні властивості ливарних титанових сплавів нижчі, ніж деформівних аналогічного хімічного складу. Фасонні виливки отримують при литті в металеві або оболонкові форми обов'язково у захисній атмосфері (через схильність сплавів до поглинання газів). Зміцнювальна термічна обробка для них не застосовується, оскільки вона погіршує їх пластичність.

Титанові сплави широко використовуються у різних галузях промисловості: аерокосмічній, суднобудівній, хімічній, харчовій, машинобудівній тощо. Тобто, титан застосовують там, де домінуючу роль грає мала вага виробів, насамперед, у ракетобудуванні та будуванні літаків. Використання титанових сплавів найбільш доцільно в інтервалі температур 250-500 °С, коли легкі алюмінієві та магнієві сплави вже не можуть працювати, а сталі та нікелеві сплави поступаються їм за питомою міцністю. До того ж титан має високу сумісність з тканинами організму людини, це біологічно інертний матеріал у агресивних середовищах.

*Порошкові сплави.* Методом порошкової металургії виготовляють шатуни двигунів, кільця компресорів, дрібні автомобільні деталі, фільтруючі елементи, які широко використовуються в нафтохімічній промисловості. Титанові фільтри застосовують при фільтрації води, ацетилцелюлози у виробництві ацетатного шовку, для очищення азоту при виробництві поліетилену, для тонкої фільтрації азотної кислоти. Методом порошкової металургії виготовляють корпуси підшипників, запірні кільця та лопатки компресора турбодвигунів, фітинги, що використовують у хімічній промисловості та які вдвічі дешевші, ніж виготовленні куванням.

## 10.5 Сплави на основі магнію

Магній – найбільш легкий з кольорових металів ( $\gamma = 1,75 \text{ г/см}^3$ ), температура плавлення – 650 °С, не має алотропічних перетворень. Технічно чистий магній має низькі механічні

властивості, схильний до samozапалення, має низькі тепло- та електропровідність. Використовується в техніці у вигляді сплавів. До складу магнієвих сплавів входять алюміній, цинк, марганець, церій. При цьому з їх введенням міцність магнієвих сплавів зростає до 200-450 МПа. Сплави магнію поділяють на *деформівні* та *ливарні*.

*Деформівні магнієві сплави* маркують літерами МА та цифрами від 1 до 14 (МА1 - МА14), які означають номер сплаву. Сплави магнію мають високі механічні властивості та технологічну пластичність, наприклад, МА2, який піддається всім видам листового штампування та прокатування. Сплав МА8 має гарну технологічну пластичність, зварюваність, корозійну стійкість; відноситься до сплавів низької міцності. Додаткове легування його церієм (~ 0,2 %) подрібнює зерно, підвищує механічні властивості та здатність до холодної деформації. З деформівних магнієвих сплавів шляхом обробки тиском виготовляють прутки, листи, профілі для отримання деталей літаків та автомобілів. Хімічний склад і властивості деяких деформівних магнієвих сплавів наведені в таблиці 10.4.

*Ливарні магнієві сплави* використовують для виготовлення деталей методом лиття. Їх маркують літерами МЛ та цифрами. Що означають порядковий номер сплаву (МЛ1 - МЛ12). Виливки з магнієвих сплавів піддають відпалу (200-250 °С) для зняття внутрішніх напруг або гартуванню (380-415 °С) для гомогенізації, тобто для розчинення надлишкових фаз. Найпоширенішим з цієї групи сплавів є МЛ5, мікроструктура якого наведена на рис. 10.9.

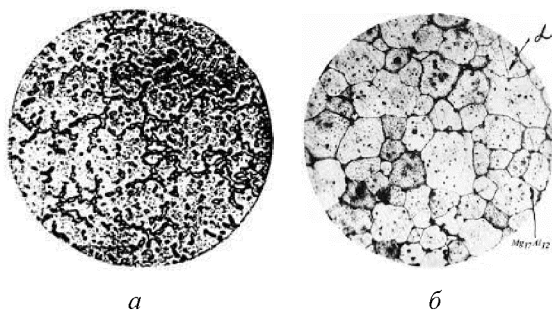


Рис. 10.9. Мікроструктура сплаву МЛ5.  $\times 250$ .  
 а –  $\alpha$ -розчин та включення  
 $Mg_4Al_8$  у литому стані; б – пересичений  
 $\alpha$ -розчин у загартованому стані



Таблиця 10.4. Хімічний склад і властивості магнієвих сплавів

Марка сплаву	Вміст елементів, мас. час. %				Термічна обробка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	HB
	Al	Mn	Zn	Ce					
Деформівні сплави									
МА2	4,0-5,0	0,40-0,80	0,8-1,0	–	Відпал	280	180	10	55
МА3	5,5-7,0	0,15-0,5	0,5-1,5	–	Відпал	300	240	12	60
МА5	7,8-9,2	0,15-0,5	0,2-0,8	–	Гартування (від 415-425 °С). Штучне старіння (175°С) протягом 16-24 год.	320	220	14	55
МА8	–	1,5-2,0	–	0,15-0,35	Відпал	250	160	18	50
Ливарні сплави									
МЛІ2	–	1,0-2,0	–	–	Після лиття	100	35	4	35
МЛІ3	2,5-3,5	0,15-0,5	0,5-1,5	–	Після лиття	180	55	8	45
МЛІ4	5,0-7,0	0,15-0,5	2,0-3,0	–	Після лиття	180	95	5	50
					Відпал (250°С)	180	80	6	60
					Гартування (від 380°С)	230	85	9	50
МЛІ5	7,5-9,0	0,15-0,5	0,2-0,8	–	Після лиття	160	95	3	50
					Відпал (250°С)	150	80	5	50
					Гартування (від 415°С)	230	85	9	50
МЛІ6		0,15-0,5		–	Після лиття	160	100	1,5	50
					Відпал (250°С)	240	80	9	60
					Гартування (від 415°С)	250	120	2	65

Литі магнієві сплави МЛ застосовують для високо навантажених деталей авіаційної промисловості (картери, корпуси приладів, шасі тощо). З огляду на низьку корозійну стійкість магнієвих сплавів вироби з них піддають окисуванню з наступним нанесенням на них лакофарбових покриттів.

## 10.6. Цинкові сплави та їх використання

Цинк – метал з низькою температурою плавлення ( $419\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та високою питомою вагою ( $7,14\text{ г/см}^3$ ), відносно низькою міцністю ( $\sigma_{\text{в}} = 150\text{ МПа}$ ) та високою пластичністю ( $\delta \sim 50\text{ }\%$ ). Кристалічна ґратка – гексагональна, алотропічних перетворень – не має.

У залежності від чистоти цинк поділяють на марки ЦВ (99,99 % Zn); Ц0 (99,96 % Zn); Ц1 (99,94 % Zn); Ц2 (99,9 % Zn); Ц3 (98,7 % Zn); Ц4 (97,5 % Zn). Домішками технічного цинку є свинець (основне забруднення), залізо, кадмій та деякі інші.

Легуючим компонентам в цинкових сплавах зазвичай є алюміній (до 5-10 %). У системі *Zn-Al* можливе утворення твердих розчинів –  $\beta$ -твердий розчин, який являє собою майже чистий цинк, та  $\alpha$ -твердий розчин на основі алюмінію, що розчиняє майже 83 % Zn. Структура сплавів цинку з вмістом 5-10 % Al у литому стані наведена на рис. 10.10.

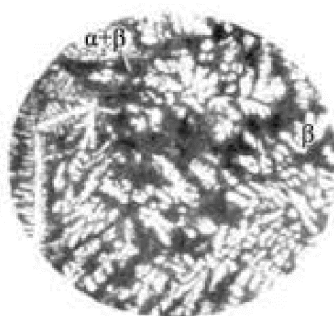


Рис. 10.10. Мікроструктура литого сплаву з 96% Zn,  $\times 100$ :  
дендрити  $\beta$ -фази (світлі);  
 $\alpha$  – фаза, що частково розпалась (темний фон)

Найміцнішими цинковими сплавами є потрійні сплави *Zn-Al-Cu*. Структура цих сплавів різноманітна і залежить, головним чином, від співвідношення та кількості алюмінію та міді. Вона складається з первинних виділень  $\beta$  (чистий Zn),  $\alpha$  (розчин на базі алюмінію, багатий цинком) або  $\epsilon$  (хімічні з'єднання  $\text{CuZn}_3$ ), подвійної евтектики  $\beta+\alpha$ ,  $\epsilon+\alpha$ ,  $\beta+\epsilon$  та потрійної евтектики  $\beta+\alpha+\epsilon$ .

Цинк застосовується для гарячого та гальванічного оцинкування сталевих листів, у поліграфічній промисловості, для виготовлення гальванічних елементів

тощо. Цинк також використовують як добавку в різні сплави (у першу чергу сплави міді), та як основу для цинкових сплавів (припоїв, цинкових бабітів), а також як друкарський метал. З цинкових сплавів виготовляють різноманітні деталі автомобілів, велосипедів, холодильників, а також пресовий інструмент.

Хімічний склад та призначення деяких цинкових сплавів наведено в таблиці 10.5.

Таблиця 10.5. Хімічний склад та призначення промислових цинкових сплавів

Марка сплаву	Основні компоненти, % мас.			Призначення
	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	
ЦА4	3,5-4,5	–	0,03-0,08	Для лиття під тиском
ЦАМ4-1	3,5-4,5	0,75-1,25	0,03-0,08	
ЦАМ4-3	3,5-4,5	2,5-3,5	0,02-0,10	
ЦМ1	–	0,8-1,2	–	Для виготовлення листів, профілів прокату та пресування
ЦАМ0,2-4	3,5-4,5	0,2-0,15	–	
ЦАМ10-1	9-11	0,6-1,0	0,02-0,05	
ЦАМ15	14-16	–	0,02-0,04	

## 10.7. Припої

В залежності від температури плавлення розрізняють *тверді* та *м'які* припої.

*Тверді припої* мають високу температуру плавлення, спай має високі механічні властивості, але паяння утруднене. Тверді припої є сплавами міді й цинку (латуні), а також міді, цинку та срібла (срібні припої). Тверді припої мають температуру плавлення 800-900 °С.

Срібні припої. Прикладами срібних припоїв є:

ПСр72 (27,3-28,5 % *Cu*, решта – *Ag*);  $T_{\text{плав}} = 779$  °С.

ПСр50 (49,3-50,5% *Cu*, решта – *Ag*);  $T_{\text{плав}} = 779-850$  °С.

ПСр45 (29,5-30,5% *Cu*, 24-26,6% *Zn*, решта – *Ag*);  $T_{\text{плав}} = 660-725$  °С.

*М'які припої* мають низьку температуру плавлення, механічні якості низькі ( $\sigma_s = 5-7$  кгс/мм<sup>2</sup>) і забезпечують тільки герметичність спаю. М'які припої є сплавами легкоплавких металів: свинцю, олова, вісмуту та кадмію.

Олов'яно-свинцеві:

ПОС-90 (90 % *Sn*, < 0,15 % *Sb*; решта – *Pb*);  $T_{\text{плав}} = 185-220$  °С;

ПОС-61 (56-61 % *Sn*, ≤ 0,8 % *Sb*; решта – *Pb*);  $T_{\text{плав}} = 183-185$  °С;

ПОС-18 (17-18 % *Sn*, 2-2,5 % *Sb*; решта – *Pb*);  $T_{\text{плавл}} = 183\text{-}227\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
Олов'яно-цинкові припої:  
ПОЦ-90 (90 % *Sn*, решта – *Zn*);  $T_{\text{плавл}} = 198\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40 та ін.

Свинцево-срібні припої:

ПСр1,5 (1,3-1,7 % *Ag*, 0,75-1,25 % *Sn*, решта – *Pb*);  $T_{\text{плавл}} = 309\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  
ПСр2,5 (2,5-2,7 % *Ag*, решта – *Pb*);  $T_{\text{плавл}} = 304\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  
ПСр3 (2,7-3,3 % *Ag*, решта – *Pb*);  $T_{\text{плавл}} = 300\text{-}305\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 10.8 Легкоплавкі сплави

Це сплави з температурою плавлення нижчою, ніж у олова (230 °C). Компонентами цих сплавів є метали з низькою температурою плавлення (свинець, олово, вісмут, індій, ртуть, кадмій). Легкоплавкі сплави використовують для виготовлення запобіжників і плавких вставок, матеріалу для анатомічних зліпків, особливо легкоплавких припоїв для деталей приладів і т. ін.

Маркування: Л – легкоплавкий сплав + цифри, що показують температуру плавлення сплаву у °C:

Л199 (91,1 % *Sn*, 8,9 % *Zn*); Л183, Л141, Л130, Л96, Л68 (сплав Вуда: 12,5 % *Sn*, 25 % *Pb*, 12,5 % *Cd*, 50 % *Bi*), Л58, Л47. Сплави з додаванням ртуті (амальгами) мають температуру плавлення нижче 100 °C. Це сплави системи (*Sn-Pb-Bi-Ag*).

## Питання для самоконтролю

1. На які групи поділяються алюмінієві сплави за технологічною ознакою та від здатності зміцнюватися термічною обробкою?
2. Чим зумовлена здатність алюмінієвого сплаву зміцнюватися термічною обробкою?
3. Як позначаються марки деформівних та ливарних алюмінієвих сплавів?
4. Що таке дуралюміні? Якою термічною обробкою вони зміцнюються?
5. Що таке силуміні? До якої групи за технологічною ознакою належать ці сплави?
6. Де використовують литі алюмінієві сплави?

7. Які сплави називають латунями, бронзами?
8. За якими принципами маркують латуні?
9. За якими ознаками класифікують бронзи? Як вони маркуються? Наведіть приклади марок.
10. Які вимоги ставляться до властивостей антифрикційних матеріалів?
11. Наведіть галузі використання антифрикційних матеріалів різних видів.
12. За якими ознаками класифікують титанові сплави?
13. Яка термічна обробка застосовується для підвищення зносостійкості титанових сплавів?
14. В яких галузях народного господарства використовують титанові сплави?
15. Наведіть принципи маркування сплавів з магнію. Де застосовуються ці сплави?
16. Як маркуються сплави на основі цинку? Наведіть приклади маркування цих сплавів.
17. Де застосовуються сплави на основі цинку?
18. Що таке припої?
19. На які групи поділяються припої в залежності від температури плавлення?
20. Що є основою м'яких та твердих припоїв?
21. Які сплави відносяться до легкоплавких?
22. Як маркуються легкоплавкі сплави та де застосовуються?

## РОЗДІЛ 11

### СТАЛІ І СПЛАВИ З ОСОБЛИВИМИ ФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

#### 11.1 Сплави високого електричного опору

Матеріали високого електричного опору (високоомні) призначені для виготовлення ненавантажених деталей, що працюють в окислювальних середовищах та електронагрівальних елементів приладів та печей. Вони повинні мати високу стабільність електроопору протягом часу, а також низький температурний коефіцієнт опору в зоні високих температур. Використовуються для резисторів, реостатів, обмоток потенціометрів, шунтів, котушок опору, нагрівальних елементів печей та побутових виробів, термопар.

Сплави високого омичного опору бувають *реостатні* та *нагрівальні*.

До реостатних сплавів відносяться: *манганін* – сплав на основі міді, легований марганцем і нікелем МНМц 3-12 – для прецизійних (особливо точних) елементів опору: резисторів різного призначення, шунтів, датчиків тощо; *константан* – сплав міді з нікелем МНМц 40-1,5 – для технічних елементів опору і *копель* (МНМц 43-1,5). Вони мають знижені механічні властивості, головним недоліком є їх схильність до окислення при нагріванні.

Робоча температура манганіну складає 200 °С. З метою одержання стабільних значень електроопору вироби з манганіну зазвичай піддають рекристалізаційному відпалу у вакуумі (400-500 °С). Іноді додатково відпалюють вже готові елементи опору, які нагрівають до 250 °С для зняття залишкових напружень.

Константан використовують при більших температурах, порівняно з манганіном. Однак, вартість константану через значну кількість дорогого та дефіцитного нікелю вища за манганін, що слід завжди враховувати. Це дещо обмежує його використання. Хімічний склад та властивості цих сплавів наведені у таблиці 11.1.

Таблиця 11.1. Хімічний склад і властивості реостатних сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, %			$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-4}$ °C <sup>-1</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Робоча температура, °C
	Ni+Co	Mn	Си					
МНМц 3-12 Манганін	2,5-3,5	11,5-13,5	реш-та	0,43 (0,46)	2	400-550 (700-850)	10-30 (≤ 7)	до 200
МНМц 40-1,5 Константан	39-41	1-2	реш-та	0,48 (0,52)	3	390-500 (700-840)	10-25 (2-4)	до 500

Примітка: для м'якого стану – без дужок, для твердого – у дужках.

До нагрівальних сплавів відносяться: сплави на основі заліза – *фехралі* (Х13Ю4) та *хромалі* (Х23Ю5, Х27Ю5А) або на основі нікелю – *ніхром* (Х20Н80, Х15Н60). Ці сплави мають бути жаростійкими та жароміцними (таблиця 11.2).

Таблиця 11.2. Хімічний склад і властивості нагрівальних сплавів

Марка матеріалу	Хімічний склад, %				$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^{-4}$ °C <sup>-1</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Робоча температура, °C
	Cr	Al	Fe	Ni					
Фехраль Х13Ю4	12-15	3,5-5,5	основа	0,6	1,2-1,35	1,3	~700	~15	900
Хромаль	21-25	4,5-5,3	основа	< 0,6	1,35-1,37	1,4	800	10-12	1200
Ніхром Х20Н80	20-23	-	≤ 1,5	основа	1,0-1,1	9	650-700	25-30	1100

Фехраль – це хромо-алюмінієва сталь, а ніхром – хромонікелевий сплав. Фехралі та хромалі є матеріалами дешевими, недефіцитними, мають достатню міцність, але крихкі через присутність алюмінію, що утруднює пластичну деформацію. З них одержують дріт та стрічки тільки великого перерізу, які використовують в нагрівальних приладах значної потужності та в промислових електричних печах.

Ніхром має достатню міцність у поєднанні з високою пластичністю. Сплав технологічний, жаростійкий, але дуже дорогий, бо містить багато дефіцитного нікелю. Для здешевлення сплаву та поліпшення технологічних властивостей частину нікелю замінюють на залізо. Такі сплави називають *фероніхромами* (X15H60, яка містить ~25 %Fe і має робочу температуру 1000 °C).

Ніхроми застосовують при виготовленні потенціометрів, паяльників, нагрівальних елементів кип'ятильників та електричних печей, які працюють довгий термін

## 11.2 Матеріали для термопар

Для виготовлення термопар використовують в основному сплави на основі металів, хоча існують матеріали з величинами термоЕРС, які набагато перевищують термоЕРС металів. До таких матеріалів можна віднести напівпровідники. Однак, виготовлення термопар з напівпровідників дуже складне та з-за їх техніко- та конструктивних особливостей такі термопари не знайшли широкого використання.

Матеріали термопар вибирають за наступними характеристиками: допустима робоча температура спаю; питомий коефіцієнт електричного опору; температурний коефіцієнт питомого електричного опору; коефіцієнт термоелектрорушійної сили (термоЕРС). Матеріали підбираються таким чином, щоб у діапазоні вимірювання температур забезпечити максимальне значення термоЕРС. При цьому похибка при визначенні температури має бути мінімальною.

Виходячи з цих умов, для виготовлення термопар використовують такі сплави:

- до 350 °C – мідь-копель; мідь-константан;
- до 600 °C – хромель-копель; залізо-константан; залізо-копель;
- до 900-1000 °C – хромель-алюмель;
- до 1600 °C – платина-платинородій;
- до 2000 °C – вольфрам-реній.

З металевих термопар найбільшу термоЕРС при однаковій різниці температур має термопара хромель-копель. Склад сплавів та їх питомий опір наведені в таблиці 11.3.



Таблиця 11.3. Склад та питомий опір матеріалів для термопар

Параметр	Копель	Хромель	Платинородій	Алюмель
Склад сплаву	44 % <i>Ni</i> , 56 % <i>Cu</i>	90 % <i>Ni</i> , 10 % <i>Cr</i>	90 % <i>Rt</i> 10 % <i>Rh</i>	95 % <i>Ni</i> , 5 % <i>Al</i> , <i>Si</i> , <i>Mn</i>
Питомий коефіцієнт електричного опору $\rho$ , мкОм·м	0,465	0,66	0,19	0,305

Більшість термопар стало працюють в окислювальному середовищі. В процесі довготривалої експлуатації може спостерігатися поступова зміна термоЕРС термопари. Причинами такої нестабільності є забруднення домішками з оточуючої атмосфери, які вносять внутрішні напруження та створюють неоднорідність структури. Найбільш високу стабільність, точність, відтворюваність мають платинородієві термопари, не дивлячись на мале їх значення термоЕРС. Це зумовлено хімічною інертністю матеріалу та високим ступенем чистоти матеріалу, що отримують.

Для вимірювання криогенних (від'ємних) температур використовують термопару залізо-золото.

### 11.3 Магнітні сталі та сплави

Магнітні матеріали здатні при внесенні їх у магнітне поле намагнічуватися, а деякі з них зберігають намагніченість і після усунення дії магнітного поля.

#### 11.3.1 Основні поняття та визначення

Основні відомості про магнітні властивості матеріалів, а отже, і галузі їх застосування, можна одержати з кривих намагнічування, які характеризують залежність магнітної індукції  $B$  від напруженості зовнішнього поля  $H$  (рис. 11.1).

Петля гістерезисну дозволяє визначити такі головні характеристики магнітних матеріалів як індукція насичення, залишкова індукція, коерцитивна сила.

Індукція насичення  $B_s$  – максимальне значення індукції за умови насичення намагнічування, вимірюється в тесла (Тл).

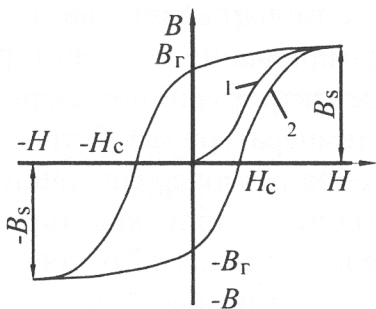


Рис. 11.1. Криві намагнічування:  
1 – первинна;  
2 – гістерезисна

Інтенсивність намагнічування, тобто зростання індукції при збільшенні напруженості поля, характеризує *магнітна проникність*  $\mu = B/H$ . Вона визначається як тангенс кута нахилу дотичної до первинної кривої намагнічування  $B = f(H)$  і вимірюється в Генрі на метр (Гн/м). У досить слабких полях вона називається початковою магнітною проникністю.

При перемагнічуванні матеріалу виникають втрати електричної енергії у вигляді тепла, які поділяють на втрати на гістерезис та динамічні втрати. Втрати на гістерезис, або перемагнічування, значною мірою залежать від властивостей та об'єму матеріалу і визначаються за площею петлі гістерезису. Для зменшення цих втрат використовують матеріали з вузькою петлею гістерезису, тобто дуже малою коерцитивною силою.

Динамічні теплові втрати пов'язані, насамперед, з появою вихрових струмів Фуко. Ці втрати прямо пропорційні квадрату частоти струму і товщині матеріалу та обернено пропорційні електроопору матеріалу. Для зменшення динамічних втрат використовують магнітні матеріали з високим електроопором. В електротехнічних сталях підвищення електроопору досягають шляхом її легування кремнієм. Використання у магнітопроводах тонких стрічок, листів, дроту з ізолюваною поверхнею зменшує втрати на вихрові струми. Теплові втрати визначають робочі частоти магнітних матеріалів.

Магнітні матеріали, за величиною коерцитивної сили поділяються на магнітом'які та магнітотверді.

Залишкова індукція  $B_r$  – індукція, що залишається після намагнічування і подальшого зняття зовнішнього магнітного поля, вимірюється в гаусах (Гс).

Коерцитивна сила  $H_c$  – від'ємна напруженість магнітного поля, необхідна для повного розмагнічування (при  $B_r = 0$ ); вимірюється в А/м.

Інтенсивність намагнічування, тобто зростання індукції при збільшенні напруженості поля, характеризує *магнітна проник-*

Відомо, що речовина, магнітна проникність якої більше одиниці, називається *парамагнетиком*, а якщо менше одиниці – *діамагнетиком*. Відхилення від рівноважного стану (напруги в ґратках, що викликані фазовими перетвореннями, наклепом, подрібненням зерен і т. ін.) сприяють підвищенню коерцитивної сили. Зміни в будові, що викликають підвищення механічної твердості, підвищують також і магнітну твердість (коерцитивну силу). Отже, цим і пояснюється застосування термінів «магнітна твердість» або «м'якість».

Якщо коерцитивна сила в матеріалі менше  $5 \cdot 10^4$  А/м ( $H_c < 5 \cdot 10^4$  А/м), вони легко перемагнічуються і називаються магнітом'якими матеріалами. Якщо коерцитивна сила в матеріалі більше  $40 \cdot 10^4$  А/м ( $H_c > 40 \cdot 10^4$  А/м), вони важко перемагнічуються і називаються магнітотвердими матеріалами.

### 11.3.2 Магнітотверді матеріали

Магнітотверді матеріали – це висококоерцитивні сплави, які мають високу залишкову індукцію – ( $B_r$ ) і застосовуються для постійних магнітів і для запису інформації (наприклад, для звукозапису). Основними вимогами до цих матеріалів є висока коерцитивна сила і велика залишкова індукція, які мають зберігатися стабільними протягом довгого часу і при можливих коливаннях температури. Для отримання високої коерцитивної сили сплави повинні мати нерівноважну структуру з високою густиною дефектів будови.

1. *Високовуглецеві сталі У10-У12* в загартованому стані зі структурою мартенситу використовують для магнітів перерізом менше 7 мм. Чим більше вуглецю в мартенситі, тим вище коерцитивна сила (тобто високий рівень внутрішніх напружень). Вони мають коерцитивну силу  $H_c = (60-70) \cdot 10^4$  А/м. Для підвищення прогартовуваності їх легують хромом, кобальтом. Такі сталі маркують літерою Е, за якою ставлять позначені літерами легувальні елементи та їх кількість (ЕХ, ЕХ5К5). Легувальні елементи підвищують магнітні характеристики, поліпшують механічну та температурну стабільність магнітів.

2. *Сплави на основі заліза (Fe), кобальту (Co), нікелю (Ni), алюмінію (Al)*. Це сплави – алніко, які легують міддю та кобальтом (ЮНДК15), магніко (ЮНДК24), алнісі (ЮНС).

Хімічний склад, режими термічної обробки та магнітні властивості магнітотвердих сплавів наведено в таблиці 11.4.

Таблиця 11.4. Хімічний склад, режими термічної обробки та магнітні властивості магнітотвердих матеріалів

Сплав	Склад, мас. %	Коерци- тивна сила, А/м	Залиш- кова індукція, Гс	Питома магнітна енергія, Дж/м <sup>3</sup>	Термічна обробка
Вуглецева сталь У10	1C	4800	560	–	Гартування при 1000 °С у воді
Хромиста сталь EX3	1C; 3,2Cr	4800	85500	1100	Нормалізація при 1200 °С; гартування від 860 °С, масло
Кобальтова сталь EX5K5	1C; 5Cr; 5 Co	7200	76500	1500	Нормалізація при 1150 °С; гартування від 950 °С, масло
Алнісі (ЮНС)	22Ni; 11Al	20000	63000	2800	Гартування від 1200°С у киплячій воді
Алніко (ЮНДК12)	18Ni; 10Al; 12Co; 6Cu	40000	56000	5500	Нормалізація при 1250 °С
Магніко (ЮНДК24)	13,5Ni; 9Al; 24Co; 3Cu	40000	110700	15000	Гартування від 1300 °С у магнітному полі; відпуск при 600 °С

Примітка: Mn ≤ 0,4%; Si ≤ 0,4%; S ≤ 0,03 %; P ≤ 0,03 %; решта – Fe.

Нормалізацію проводять для розчинення великих включень карбідних фаз, які можуть утворюватися при попередньому відпалі та не розчинившись в аустеніті, можуть не забезпечити потрібних магнітних властивостей. Надлишковий парамагнітний аустеніт може

бути усунутий обробкою холодом; відпуск при 100 °С, хоча незначно знижує коерцитивну силу, однак стабілізує її величину в часі.

Магніко мають дуже велику енергію максимального магнітного потоку. Поліпшити властивості магніко можна термомагнітним обробленням. Магнітне поле прикладають, коли сплав знаходиться в однофазному стані. Подальше підвищення властивостей очікується, якщо використовувати не полікристалічні матеріали, а монокристали зі стовпчастою структурою.

Сталеві постійні магніти виготовляють куванням з наступним відпалом та механічною обробкою. Залізо-нікель-алюмінієві сплави механічній обробці не піддаються, а виготовляються або литтям, або металокерамічним способом з наступним шліфуванням.

### 11.3.3 Магнітом'які матеріали

Ці матеріали експлуатуються в умовах циклічної зміни магнітних полів і безперервного перемагнічування. Вони мають вузьку петлю гістерезису, низьку коерцитивну силу, малі втрати на гістерезис, високу магнітну проникність. Такі матеріали використовують для осердь котушок трансформаторів, генераторів, електродвигунів, роторів та статорів асинхронних двигунів тощо.

Для отримання високої магнітної проникності та низької коерцитивної сили матеріал має бути гомогенним (чистий метал або твердий розчин), з мінімальною кількістю домішок і дефектів кристалічної будови, мати грубозернисту структуру, максимально наближену до рівноважного стану (повністю рекристалізовану для усунення внутрішніх напружень після наклепу).

Типовим магнітом'яким матеріалом є технічно чисте залізо, яке містить менше 0,05 % вуглецю при мінімальній кількості інших домішок. Це дешевий і технологічний матеріал. Технічне залізо характеризується високими значеннями магнітних властивостей, але має низький питомий електричний опір, що збільшує втрати при перемагнічуванні. Тому його використовують для виготовлення виробів, які працюють лише в постійних магнітних полях. Технічне залізо є основою практично усіх феромагнітних сплавів.

У промисловості також використовуються електролітичне і карбонільне залізо вищої чистоти, але через високу вартість їх використовують рідко.

Найпоширенішим магнітом'яким матеріалом масового використання є електротехнічна кремнієва сталь (твердий розчин кремнію в технічному залізі). Вимоги до електротехнічних сталей:

дешевина, пластичність при малих товщинах (0,3 - 0,5 мм), феромагнітність. Легування заліза кремнієм (до 4,8%) значно збільшує питомий опір і зменшує втрати на вихровий струм. Присутність кремнію також підвищує магнітну проникність, сприяє росту зерен і знижує втрати на гістерезис.

Магнітні властивості сталі суттєво поліпшуються внаслідок утворення магнітної текстури в процесі її холодного прокатування і наступного відпалу. Після прокатування з великим ступенем деформації ( $\geq 70\%$ ) і нагріву сталі до температури понад 1000 °С відбувається рекристалізація, яка супроводжується орієнтацією ґраток у зернах  $\alpha$ -заліза уздовж напрямку легкого намагнічування – ребра куба. Утворюється реброва текстура рекристалізації, яка сприяє підвищенню магнітних властивостей вздовж напрямку прокатування, що призводить до магнітної анізотропії.

Сталі з магнітною анізотропією застосовуються в конструкціях магнітопроводів таким чином, щоб магнітний потік проходив у напрямку найкращих магнітних властивостей.

Використання текстурованої сталі у трансформаторах різного призначення дозволяє суттєво (до 40 %) знизити втрати потужності і зменшити розміри та масу трансформатора.

За ГОСТ 21427-75 електротехнічні сталі маркуються цифрами. Перша цифра визначає вид прокату та структурний стан: 1 – гарячекатана ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою. Друга цифра відповідає вмісту кремнію, %: (0 – вміст  $< 0,4$ ; 1 – 0,4-0,8); 2 – 0,8-1,8; 3 – 1,8-2,8; 4 – 2,8-3,8; 5 – 3,8-4,8). Третя цифра – основна нормована характеристика (втрати при певній частоті та індукції). Четверта цифра – код нормованого параметру. Наприклад, 1411 означає, що сталь гарячекатана, ізотропна, з вмістом кремнію від 2,8 до 3,8 %; питомі втрати при індукції 1,5Тл і частоті струму 50 Гц дорівнюють 4,4 Вт/кг. Марка 3411 – це холоднокатана анізотропна сталь з тим же вмістом кремнію, але втратами 2,45 Вт/кг.

До 1975 року електротехнічні сталі маркувалися літерою Э («электротехническая») і цифрами, де перша вказує середній вміст кремнію (1, 2, 3, 4 %), друга – гарантовані електричні та магнітні властивості при експлуатації в певних умовах (від 1 до 8). Наприклад, Э11 (1% Si), Э48 (4 % Si). Далі додають цифри нуль (текстурована сталь) або два нулі (малотекстурована сталь). Літера А в кінці вказує на особливо низькі втрати на перемагнічування (Э300, Э340А).

До магнітом'яких сплавів належать також *пермалої* – сплави заліза з нікелем, які застосовують для роботи в слабких постійних і змінних полях. Їх магнітна проникність значно вища, ніж технічного заліза та електротехнічної сталі. Розрізняють низьконікелеві 45Н, 50Н (45-50% *Ni*) і високонікелеві 79 НМ (79 % *Ni*; 3-4 % *Mo*) пермалої. Пермалої є високо пластичними, що дозволяє виробляти з них тонкий лист, стрічки, дріт дуже малого діаметру.

Низьконікелеві пермалої застосовують для деталей, які працюють в змінних магнітних полях при високих частотах. Високонікелеві використовують для осердь потужних силових трансформаторів та інших пристроїв, через які протікає великий магнітний потік. Розроблений також замітник дорогих пермалоїв – сплав алсіфер, що містить 5,4 % *Al*; 9,6 % *Si*, решта – залізо, основним недоліком якого є підвищена крихкість. Алсіфер звичайно використовують у вигляді порошку або тонкостінних фасонних виливків, бо він є ливарним сплавом.

Хімічний склад та магнітні властивості магнітом'яких сплавів наведено у таблиці 11.5.

Таблиця 11.5. Хімічний склад та магнітні властивості магнітом'яких матеріалів

Матеріал	Мар-ка	Склад, % мас.	Коерцитивна сила, А/м	Залишкова індукція, Гс	Магнітна проникність, Гс/Е
Технічне чисте залізо	Е	–	96	189000	3500
	ЕА	–	80	–	4000
	ЕАА	$\leq 0,1 C$	64	–	4500
Електролітичне залізо		$\leq 0,1 C$	28,5	195000	15000
Електротехнічна кремниста сталь	Е31	$\leq 0,1 C$	44	171000	5500
	Е310	3,3 <i>Si</i>	9,6	171000	30000
	Е41	$\leq 0,1 C$	36	171000	6000
	Е45	4,3 <i>Si</i>	20	–	10000
Пермендюр	–	50 <i>Co</i> ; 1,8 <i>V</i>	144	214000	4000
Пермалой	45Н	45 <i>Ni</i>	16-24	135000	16000-23000
	79Н	79 <i>Ni</i>	2	1233000	100000
Алсіфер	–	9,6 <i>Si</i> 5,4 <i>Al</i>	1,76	99000	117000

В промисловості знаходять використання також немагнітні (парамагнітні) матеріали. До них належать сталі аустенітного класу (12Х18Н10Е, 40Г14Н9Ф2 та ін.), які застосовують в електротехніці, приладобудуванні, суднобудуванні тощо. Якщо вироби з цих сталей працюють в умовах тертя, їх зносостійкість підвищують азотуванням. До немагнітних матеріалів відносяться немагнітні чавуни, наприклад, нікель-марганцеві (вміст марганцю 7-10 %, нікелю – 7-9 %) або марганцево-мідні, які містять 9,8% марганцю та 1,2-2,0 % міді, використовуються для виготовлення кожухів і бандажів електричних машин.

Для високо- та надвисокочастотної (від сотень до десятків тисяч мегагерців) техніки необхідні матеріали, які мають дуже

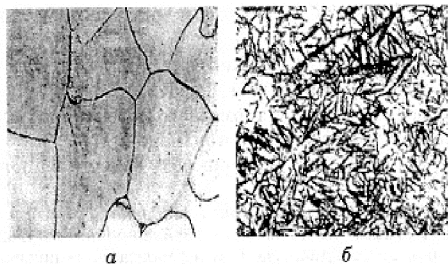


Рис. 11.1 – Мікроструктура магнітних сталей:

а – магнітом'яка 1511;

б – магнітотверда EX3

великий електричний опір (на 10-12 порядків вищий за електроопір заліза) і високу магнітну проникність у широкому частотному діапазоні. Таким вимогам відповідають ферити (не слід плутати з фазою ферит, яка існує у залізівуглецевих сплавах). Це магнітна кераміка, яку отримують спіканням оксиду заліза та інших металів ( $MnO$ ,  $ZnO$ ,  $LiO_2$ ).

#### 11.4. Сплави з заданим коефіцієнтом теплового розширення

Ці сплави використовують в приладобудування та машинобудуванні для геодезичних приладів, маятників, хронометрів і т. ін., а також для впаювання металу в скляний або керамічний корпус вакуумних приладів (телевізійні кінескопи, рентгенівські трубки, лампи тощо).

Сплави для деталей, від яких вимагаються постійні розміри, повинні мати мінімальний коефіцієнт теплового розширення, який не залежить від температури. До таких сплавів належить інвар – сплав на основі заліза з нікелем, коефіцієнт теплового розширення якого в



інтервалі температур від  $-60$  до  $100$  °C близький до нуля. Інвар (англ. Invar) маркується: 36Н, застосовується для виготовлення деталей приладів, що не повинні помітно змінювати розміри при коливаннях температури (еталонів довжини, геодезичних приладів тощо).

33НК (англ. Invarco) ( $Ni - 33\%$ ,  $Co - 4,5\%$ , решта – залізо, у відпаленому стані має температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР)  $\alpha$  не більше  $1,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$  (в діапазоні  $-60 - 100$  °C). Особливо чисті сплави мають ТКЛР до  $0,55 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$  (в діапазоні  $20 - 100$  °C).

42Н (англ. NILO, FeNi42), який містить  $42\%$   $Ni$ , має  $\alpha \approx 5,3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ , такий же, як і у кремнію, що дозволяє широко використовувати його в електроніці.

29НК (англ. Kovar і англ. Dilver P) ( $Co - 17\%$ ,  $Ni - 29\%$ , решта – залізо) – сплав, який має ТКЛР, як у боросилікатного скла, та застосовується за цією причиною в оптиці, яка може працювати в широкому діапазоні температур, наприклад, у супутниках.

Крім того, в групу сплавів із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення входять сплави 30НКД, 32НКД, 32НК-ВИ, 35НКТ, 36НХ, 38НКД, 39Н, 42НА-ВИ, 47НХ, 47НЗХ, 7НД, 47НХР, 48НХ, 52Н, 58Н-ВИ.

Хімічний склад та властивості деяких сплавів з регламентованим коефіцієнтом розширення наведені в таблиці 11.6.

Таблиця 11.6. Хімічний склад та властивості сплавів з заданим коефіцієнтом теплового розширення

Сплав	Марка сплаву	Вміст елементів, %				Коефіцієнт лінійного розширення	Температура вимірювання, °C
		<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>		
Інвар	36Н	35-37	–	–	решта	$\leq 1,5 \cdot 10^{-6}$	$-80 - +100$
Суперінвар	32НКД	30-32	4-6	0,6-0,8	решта	$\leq 1 \cdot 10^{-6}$	$-60 - +100$
Платиніт	47НД	46-48	–	4,5-5,5	решта	$\leq 9 \cdot 10^{-6}$	$+20 - +400$

Платиніт має коефіцієнт лінійного розширення такий же, як платина та скло, тому його використовують як електропровідник,

якщо спай платиніту зі склом піддається нагріванню, то в результаті однакового розширення обох матеріалів у склі не виникають внутрішні напруження. Залізонікелевий сплав з 38% Ni має коефіцієнт лінійного розширення однаковий з порцеляною, тому його використовують в радіотехніці.

Спаювання тугоплавкого скла з більш низьким коефіцієнтом лінійного розширення проводять зі сплавом *ковар*, або *елінвар*, які поряд з низьким коефіцієнтом лінійного розширення зберігають постійні пружні властивості (до 100 °C), внаслідок чого їх застосовують для виготовлення пружин у годинниках і точних приладах.

Галузь використання сплавів із регламентованим тепловим коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР) наведена в таблиці 11.7.

Таблиця 11.7. Галузь застосування сплавів із заданим ТКЛР

Інтервал значень ТКЛР, $\cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$	Галузь використання
0 - 20	Вимірювальні прилади, геодезичні вимірювальні стрічки, регулятори розширення, компенсаційні елементи, компоненти термобіметалів, криогенна техніка
50 - 80	Регулятори розширення, компоненти термобіметалів, спаї з тугоплавким склом, металокерамічні з'єднання, матеріал осердя дроту з мідною оболонкою
80 - 110	Спаї з тугоплавким склом
180 - 210	Регулятори розширення, компоненти термобіметалів

До відома, термобіметали являють собою матеріал, який складається з двох або більше шарів металів чи сплавів з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення, що забезпечує пружну деформацію при зміні температури. Більш докладно про них йтиметься нижче.

## 11.5. Метали та сплави високої електричної провідності

Усі провідникові матеріали поділяються на три групи за величиною забороненої зони, яка обумовлена питомим електричним опором: провідники, напівпровідники та діелектрики.

*Провідниками* називаються матеріали, які мають питомий електричний опір  $10^{-8} - 10^{-5}$  Ом·м і при нагріванні збільшують лінійні розміри.

*Напівпровідниками* називаються матеріали, які мають питомий електричний опір  $10^{-5} - 10^8$  Ом·м і при нагріванні зменшують лінійні розміри.

*Діелектриками* називаються матеріали, які мають питомий електричний опір  $10^8 - 10^{16}$  Ом·м і використовуються як ізолятори.

*Провідники.* Провідність провідників визначається електронною будовою металів. Кращу провідність мають: *Cu, Ag, Au, Al, Na*. Найвища провідність у *Na*, у якого енергія початку руху електронів дорівнює  $10^{-9}$  еВ. Трохи менша електропровідність у *Fe, Ni* та *Cr*.

Основним недоліком провідників є вплив температури на електричний опір. Для технічних металів та їх сплавів вплив температури нагрівання на електричний опір визначається за формулою:

$$\rho_m = \rho_o (1 + \alpha_p T),$$

де  $\rho_m$  – питомий опір при температурі за Кельвіном,

$\rho_o$  – питомий опір при  $0^\circ\text{K}$ ,

$T$  – температура за Кельвіном;

$\alpha_p$  – температурний коефіцієнт електричного опору,

що визначається як  $\alpha_p = (\Delta \rho_m / \Delta T) 1 / \rho_o$ .

Температурний коефіцієнт електричного опору  $\alpha_p$  для всіх металів, за винятком феромагнітних, дорівнює  $0,004 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , а для феромагнетиків, наприклад заліза,  $\alpha_p = 0,006 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ .

До металів високої провідності відносяться: *Cu, Al*, деякі сплави на їх основі і залізо. Присутність незначної кількості домішок, а також дефектів кристалічної будови сильно знижують електропровідність, у зв'язку з чим використовують хімічно чисті метали у відпаленому стані.

Мідь – найпоширеніший матеріал високої провідності, найшкідливішою домішкою в якому є кисень, який знижує електропровідність та міцність міді, окричує її, викликаючи розтріскування. Найвищу електропровідність має хімічно чиста мідь марки М00 (сумарний вміст домішок 0,01%). Через меншу вартість та кращі механічні властивості більш поширеними є марки М1 (з кількістю домішок 0,1%) та М0 (домішок – 0,05%). Використовують мідь у вигляді прокату (дріт, стрічки, прутки, шини), який поставляють або у відпаленому стані (ММ – мідь м'яка), або в нагартованому після холодної пластичної деформації (МТ – мідь тверда).

М'яку мідь використовують для обмотувальних та монтажних проводів, екранів радіочастотних кабелів, струмопровідних жил кабелів. Тверду мідь використовують там, де потрібні висока міцність, твердість, зносостійкість та пружність – для пластин колекторів електричних машин, контактних проводів, шин розподільних пристроїв, дротів підвісних ліній електропередач та зв'язку. Для виробів, від яких вимагається підвищена міцність, застосовують сплави на основі міді – бронзи та латуні, які забезпечують також зносостійкість, хоча при цьому провідність дещо знижується.

Наприклад, з берилієвої бронзи БрБ2 та олов'яно-цинкової БрОЦ4-3 виготовляють струмонесучі пружини, мембрани, контакти, щіткотримачі, затискачі, штепсельні роз'єми. Кадмієву бронзу БрКд1 – для струмопровідних деталей, контактних проводів та колекторних пластин відповідального призначення, які працюють в умовах зносу. З латуней Л72, Л80 виготовляють клеми високої напруги, штекери, контакти, наконечники проводів.

Друге місце серед провідникових матеріалів займає алюміній. Випускається прокат алюмінію у відпаленому (АМ – алюміній м'який), нагартованому (АТ – алюміній твердий), напівнагартованому (АПТ – алюміній напівтвердий) станах. Хоча алюміній поступається міді у електричній провідності та міцності, але він майже в 3,5 рази легший та більш поширений у природі.

З алюмінію особливої чистоти (А999) виготовляють конденсаторну фольгу, а також пластини електролітичних конденсаторів. З алюмінію високої чистоти та технічного алюмінію – струмопровідні жили, кабелі, монтажний та обмотувальний дріт. Коли

ж необхідна підвищена міцність, використовують сплави магналії (системи  $Al-Mg-Si$ ) для виготовлення ліній електропередач.

Залізо має вищий порівняно з міддю та алюмінієм питомий електроопір, але значно більшу міцність, що в деяких випадках виправдовує його застосування як провідникового матеріалу. Найчастіше використовують якісні сталі з вмістом вуглецю 0,1-0,15 %, а також сталі звичайної якості, бо ці матеріали дешеві та технологічні, тобто добре піддаються штампуванню та обробці різанням.

До *надпровідників* відносяться метали, які мають найвищу за Кельвіном температуру переходу. Одним із найкращих елементів є *ніобій* ( $Nb$ ), який має температуру переходу 9,17 °К. Тому основними над провідниковими матеріалами є сплави на основі ніобію. Найбільш розповсюдженим є сплав 65БТ (ГОСТ 10994-84), який складається з 22,0 – 26,0 %  $Ti$ ; 63,0 – 68,0 %  $Nb$ ; 8,5 - 11,5 %  $Zr$  і має критичну температурою переходу 9,7 °К (або сплав 35БТ).

*Напівпровідники*. До простих напівпровідникових матеріалів відносяться 12 елементів таблиці Менделєєва: бор, вуглець (алмаз), кремній, германій, олово, фосфор, миш'як, сурма, сірка, селен, телур, йод.

Найбільше поширення одержали: метал германій ( $Ge$ ) і металоїд ( $Si$ ), які мають ґратки алмазу, а також алмаз у вигляді монокристалів, селен та тверді розчини кремнію і германію у вигляді полікристалів.

Питомий електричний опір напівпровідникових матеріалів залежить від ширини забороненої зони, тобто рухливості носіїв і складає (при 20 °С) у германію – 0,6 Ом·м, у кремнію –  $2,4 \cdot 10^3$  Ом·м, а в алмазу –  $10^8$  Ом·м.

Напівпровідникові матеріали бувають прості і складні, *n-типу* та *p-типу*. Тип провідності визначається відхиленням від стехіометричного складу. Так, при надлишку металу буде електронна провідність, де переважають донорні домішки (або *n-типу*), а при надлишку металоїду – дірочна провідність, з перевагою акцепторних домішок (або *p-типу*).

До складних напівпровідникових матеріалів відносяться з'єднання, які утворені елементами III и V груп ( $A^{III}B^V$ ): фосфіди і арсеніди галію та індію, антимонід індію та ін., а також їх тверді розчини. Кристалічні ґратки таких напівпровідникових матеріалів –

типу *сфалериту*. Перспективними є напівпровідникові з'єднання з широкою зоною: нітриди алюмінію і галію (*Al*, *Ga*).

Широко поширені напівпровідникові матеріали, які утворюються при взаємодії елементів другої групи – цинку, кадмію і ртуті з *халькогенами* – сіркою, селеном та телуrom ( $A^{IV}B^{VI}$ ). Ширина забороненої зони таких з'єднань: від 3,6 еВ для *Zn* до нуля – для *HgTe*, які мають напівметалеві властивості.

Гарні термо- та фотоелектричні властивості мають з'єднання  $A^{IV}B^{VI}$ , халькогеніди свинцю, телуриди германію та олова, які є надпровідниковими матеріалами при низьких температурах. Застосовується також карбід кремнію (*Si*) з широкою забороненою зоною і пов'язаною з цим високою межею робочої температури. Карбід кремнію кристалізується в декількох модифікаціях: у кубічній типу *сфалериту* ( $\beta SiC$ ) або гексагональній типу *ворциту* ( $\alpha SiC$ ), які відрізняються кількістю шарів і упакуванням.

Великий клас складають потрійні напівпровідникові матеріали. Це повновалентні з'єднання зі структурою *сфалериту* і *халькопіриту*, у яких число електронів на один атом дорівнює 4, наприклад *ZnSi<sub>2</sub>*, *CdGaAs<sub>2</sub>*, *CuAl<sub>2</sub>*, *AgGaSe<sub>2</sub>* та ін. Застосування: з монокристалів германію, кремнію, арсеніду галію, фосфідів індію і галію виготовляють діоди, транзистори, тиристори, тензодатчики, інтегральні схеми та ін. З карбіду кремнію, арсеніду галію та ін. виготовляють світлодіоди для оптичної електроніки.

ФотоЕРС (електрорушійна сила), що з'являється в *n-p*-переходах при освітленні, використовується у сонячних батареях (кремній, арсенід галію, антимонід алюмінію та ін.). Зміну провідності напівпровідників при освітленні використовують у фоторезисторах, фотоприймачах іонізуючого випромінювання. Стимульована струмом генерація світла на *n-p* – переходах у напівпровідниках використовується в оптичних квантових генераторах, які працюють на арсенідах галію, індію, або на фосфіді галію. Напівпровідникові матеріали поширені в техніці прямого перетворення теплової енергії в електричну. До таких напівпровідникових матеріалів відносять телуриди і селеніди вісмуту та сурми.

## 11.6. Сплави з ефектом пам'яті форми

Ці сплави характеризуються тим, що в пластично деформованому стані відновлюють свою первинну форму безпосередньо зі зняттям навантаження або після нагрівання. Наприклад, якщо дріт при високій температурі закрутити у спіраль, а потім при кімнатній температурі виправити, то при повторному нагріванні дріт знову самочинно закрутиться у спіраль.

Механізм цього явища пов'язаний з *термонапруженим мартенситним перетворенням*, відкритим Г. В. Курдюмовим та Л. Г. Хандросом у 1949 р. Суть полягає в тому, що у певних сплавах кристали мартенситу, які утворюються при зупинці охолодження, можуть припиняти зростання, а при подальшому нагріванні зменшуватися у розмірах. При цьому послідовність перетворення мартенситу у високотемпературну фазу (аустеніт) повторює послідовність їх виникнення у зворотному порядку. Такий механізм і назвали термонапруженим мартенситним перетворенням.

Матеріали з пам'яттю форми можуть не тільки відновлювати форму, але й розвивати при цьому великі напруження, що генеруються при зовнішній механічній протидії (вони мають назву реактивних напружень).

На даний момент відома велика кількість подвійних та складних сплавів зі зворотним мартенситним перетворенням, які володіють ефектом пам'яті форми: *Ag-Cd, Au-Cd, Cu-Al, Cu-Zn, Ni-Al, Ni-Co, Ti-Ni, Ti-Nb, Fe-Ni, Fe-Pt, In-Ti, Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Si, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Al, Fe-Mg-Si*.

З наведених матеріалів тільки титано-нікелеві сплави та сплави на основі міді з добавками легуючих елементів є придатними для практичного використання. Інші сплави не придатні для промислового виробництва через те, що в їх склад входять дорогі спеціальні компоненти, або з-за неможливості виготовлення монокристалів з цих сплавів.

Найпоширенішим сплавом з пам'яттю форми є *нітанол* (TiN). Він має високі показники міцності ( $\sigma_s$  до 1100 МПа,  $\delta = 10-15\%$ ). Його використовують для антен супутників та космічних кораблів: антену закручують в маленький бунт, а після виходу на орбіту при нагріванні вище 100 °C вона приймає свою первинну форму.

## 11.7. Аморфні металеві матеріали

Аморфні метали (металеве скло) – клас металевих твердих тіл з аморфною структурою, яка характеризується наявністю ближнього порядку в розташуванні атомів. На відміну від металів з кристалічною структурою, аморфні метали характеризуються фазовою однорідністю, їх атомна структура аналогічна атомній структурі переохолоджених розплавів. Тобто, при певних умовах можна одержати метал з аморфною будовою – металеве скло. Такий процес називається силуванням.

Ще в 1940-х роках було відомо, що металеві плівки, які отримуються методом вакуумного низькотемпературного напилення, не мають кристалічної будови. Однак, початок вивченню аморфних металів було покладено в 1960 році, коли в Каліфорнійському технологічному інституті групою під керівництвом професора Дювеза було отримано металеве скло.

Для отримання аморфного стану необхідне велике переохолодження (температура силування дорівнює  $0,35-0,6 T_{пл}$ ). Його можна досягти швидкістю охолодження  $10^5 - 10^6$  °/сек. При такій швидкості охолодження зародження та ріст кристалічної фази стають неможливими, і метал твердне як аморфний.

Такої швидкості охолодження можна досягти в дуже малому перерізі, тому металеві стекла зазвичай мають вигляд тонких аморфних стрічок. Існує багато способів отримання металевого скла: осадженням газоподібного металу (вакуумне напилення, розпилення, хімічні реакції в газовому середовищі), твердінням рідкого металу (гартуванням з рідкого металу), електролітичним осадженням з розчинів, порушенням кристалічної структури твердого тіла (опромінюванням, дією ударної хвилі, іонною імплантацією). Найчастіше їх отримують при виливанні рідкого металу на поверхню диска, який швидко обертається, або в тонкий проміжок між двома такими дисками.

Аморфні сплави поділяються на два основні типи: метал-металоїд та метал – метал.

При аморфізації методом гартування з рідкого стану можуть бути отримані сплави, які містять наступні елементи:

– для типу метал-металоїд: *B, C, Si, Al, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ge, As, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Sn, Te, Hf, Ta, W, Ir, Pt, Au, Tl, La;*



– для типу метал – метал: *Be, Mg, Al, Ca, Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Sr, Y, Zr, Nb, Rh, Pd, Ag, Sb, Hf, Ta, Re, Ir, Pt, Au, Pb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Th, Dy, Ho, Er, Lu, Th, U.*

Характерною особливістю металевих стекол є висока хімічна однорідність та відсутність дефектів. Завдяки цьому вони поєднують високу міцність (близьку до теоретичної), твердість, зносостійкість з високою пластичністю, мають вищу корозійну стійкість порівняно з кристалічними матеріалами того ж складу. При цьому вони зберігають високу пластичність при стисканні та згинанні, в'язкий характер руйнування, високу зносостійкість, електро- та теплопровідність.

Аморфні метали використовують для виготовлення пружин, мембран, електроконтактів, лез для бритв. Висока міцність в поєднанні з високою корозійною стійкістю дозволяють застосовувати їх для кабелів, що працюють в контакті з морською водою чи іншими агресивними середовищами. Їх також використовують для армування трубок високого тиску, виготовлення металокорду шин.

В оборонній промисловості при виробництві захисних броньованих огорожень використовують прошарки з аморфних сплавів на основі алюмінію для гасіння енергії снаряду за рахунок високої в'язкості руйнування таких прошарків. Завдяки своїм магнітним властивостям аморфні метали використовуються при виробництві магнітних екранів, зчитуючих голівок (аудіо- та відеомагнітофонів, накопичувачів інформації), трансформаторів та інших пристроїв. Низька залежність опору деяких аморфних металів від температури дозволяє використовувати їх у якості еталонних резисторів.

Головним недоліком є мала товщина напівфабрикату (зазвичай від 50 до 2 мкм), хоча ширина може дорівнювати 15 мм. Не дивлячись на гарні механічні властивості, металеве скло не використовуються у якості відповідальних деталей конструкцій по причині їх високої вартості та технологічних складностей.

## **11.8. Нанокристалічні матеріали**

Як відомо, всі матеріали складаються з атомів та молекул. Більшість матеріалів складається з часток із розмірами від декількох сотень мікрон до декількох міліметрів.

Нанокристалічними називаються матеріали з розміром кристалітів (зерен, частинок, шарів багатшарових покриттів, фаз тощо) менше 100 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Властивості таких матеріалів суттєво відрізняються від звичайних матеріалів того ж хімічного складу.

Розмір зерна є одним з найважливіших факторів, які зумовлюють конструкційну міцність. Подрібнення зерна дозволяє одержати одночасно високу міцність, ударну в'язкість, пластичність, низький поріг холодноламкості, що вже відмічалось вище.

Особливістю наноструктурних матеріалів є великий об'єм поверхня границь зерен по відношенню до об'єму самого зерна. Зазвичай товщину граничного шару вважають рівній кільком параметрам кристалічної ґратки. Якщо прийняти цю товщину рівною 1 нанометру, то при розмірі зерна 1000 нм (тобто, 1 мкм) об'ємна частка поверхневого шару становитиме близько 1 %, 100 нм – 6 %, 30 нм – 50 %.

В об'ємі нанозерен, як і в ниткоподібних кристалах, дислокації практично відсутні. Тому нанокристалічну структуру можна уявити як комплекс раз орієнтованих частиночок ниткоподібних кристалів (вусів), де дефекти кристалічної будови зосереджені на їх границях. Але, на відміну від вусів, які пластично не деформуються та крихко руйнуються, в нанокристалічних матеріалах пластична деформація відбувається. Вона здійснюється, головним чином, по границях нанозерен, а оскільки внесок границь в загальний об'єм металу великий, у таких наноструктурних матеріалах стає можливим поєднати високу міцність з високою пластичністю (як у вусах). Авжеж міцність наноструктур менша, ніж у ниткоподібних кристалів, але вона значно вища тієї, що вдається досягти у полікристалічному матеріалі. Так, наприклад, для ниткоподібного кристалу міді  $\sigma_e = 2,94 \text{ ГПа}$ , для наноструктурної міді – 0,8 ГПа, полікристалічної – 0,24 ГПа.

Також в нанокристалічних матеріалах суттєво змінюються фізичні властивості: підвищується коефіцієнт теплового розширення, питомий електроопір, форма петлі гістерезису стає іншою, що знаходить застосування при створенні магнітних матеріалів.

Наноматеріали можуть володіти надзвичайно високою міцністю, твердістю, гнучкістю, в'язкістю при високих температурах, зносостійкістю, корозійною стійкістю, хімічною реактивністю і т. ін. Велика кількість наноматеріалів є набагато ефективнішими, ніж їх

більш крупні аналоги. Наприклад, наночастинки срібла володіють особливими каталітичними властивостями (здатністю реагувати з вірусами та вбивати їх), яких немає у макроскопічного масивного шматка срібла.

Для створення наноматеріалів звичайно використовують наступні п'ять методів: золь-гель (колоїдні) технології; конденсація в атмосфері інертного газу; механічне сплавлення або високоенергетичне перемелювання; плазмовий синтез; електролітичне осадження. Усі ці процеси використовуються для створення різної кількості наноматеріалів, але синтез на основі золь-гель-технологій дозволяє виробляти велику кількість наноматеріалів, генерувати одночасно два або більше матеріалу, створювати дуже однорідні та високочисті (до 99,99 %) сплави та композити; отримувати керамічні та металеві матеріали при дуже низьких температурах (біля 60-300 °C замість стандартних 1200-3500 °C); точно підганяти атомний склад та структуру.

Отримання нанокристалічних матеріалів методом порошкової металургії є найпоширенішим, не дивлячись на те, що нанокристалічні порошки через велику питому поверхню є дуже активними. Виготовлення з них виробів може супроводжуватися цілим рядом труднощів, пов'язаних із захистом від взаємодії з оточуючим середовищем та іншими матеріалами. Створюючи матеріали на наномасштабному рівні, інженери можуть застосовувати їх дивовижні властивості, наприклад, надвисоку міцність, для вже існуючих продуктів.

Вельми перспективними нанокристалічними матеріалами є *фуллерени*. Фуллерен – це модифікація молекули вуглецю, яка

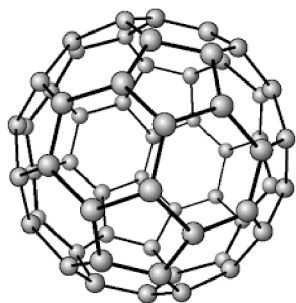


Рис. 11.2. Фуллерен

відрізняється від відомих (графіту та алмазу) упорядкованим розташуванням атомів вуглецю на сферичній поверхні (рис. 11.2). Молекули фуллерену містять 60 ( $C_{60}$ ), 70 ( $C_{70}$ ) та 82 ( $C_{82}$ ) атомів вуглецю. Вуглецева оболонка має розмір  $\sim 1$  нм зі значною внутрішньою порожниною ( $\sim 0,7$  нм). При взаємодії з металами фуллерени утворюють сполуки – фуллериди, в яких металевий атом розташовується в середині вуглецевої оболонки.

Особливістю молекул фуллерени є їх здатність утворювати вуглецеві трубки (фуллеренові нанотрубки), діаметр яких не перебільшує 2 нм, а довжина може сягати частки мікрометра. Ці матеріали дуже перспективні для розвитку електронної та комп'ютерної техніки. Крім того, завдяки високій міцності, вони можуть знайти використання у якості армувальних компонентів композитних матеріалів.

Введення фуллеренів в алюміній, дуралюміній і т. ін.. дозволяє кардинально змінити властивості матеріалів, підвищити міцність більш ніж в два рази, підвищити текучість, тим самим відкриваючи нові галузі використання, такі як авіа- та автомобілебудування, полегшені конструкції для космічних кораблів. Модифікатори, створені на основі фуллеренів, змінюють структуру полімерів та їх характеристики, збільшуючи антистатичу, антифрикційну дію та знижують горючість матеріалу. Такі матеріали призначені для важких умов експлуатації, таких, як горно-шахтна промисловість, машинобудування і т. д. Застосування косметики з фуллереном сприяє ефективній боротьбі зі всіма ознаками старіння шкіри, збереженню її молодості. Фуллерени можуть бути також використані в фармакології для створення нових ліків.

Фуллерени та їх хімічні похідні використовуються разом із поліспряженими напівпровідниковими полімерами для виготовлення сонячних панелей. Введення фуллеренів в литтєвий склад батареї збільшує їх строк служби та підвищує заряд на 30 %. Використовують фуллерени в оливах та змащувальних матеріалах, що збільшує час використання вузлів тертя машин та механізмів, їх термостабільність, розширює робочий інтервал тиску вузлів тертя у 1,5-2 рази.

Також фуллерени знайшли використання у якості добавок в інтумесцентні (які спучуються) вогнезахисні краски. За рахунок введення фуллеренів краска під дією температури при пожежі спучується, утворює досить щільний пінококсовий шар, який в декілька раз збільшує час нагрівання до критичних температур конструкцій, що треба захистити. Наприклад, при введенні модифікатора в епоксидну смолу, спостерігається покращення

показників удароміцності, горючості, роз тяжіння від 10 % до 20 % в залежності від об'єму введеного модифікатора.

До наноструктур належать також тонкі поверхневі шари виробів після іонного бомбардування та нанесення іоноплазмових покриттів тугоплавких матеріалів. Така обробка зазвичай використовується тільки з метою зміни властивостей поверхні виробів: отримання гарних трибологічних характеристик (зменшення коефіцієнту тертя та зношувальної здатності, підвищення зносостійкості), високої корозійної стійкості. Тонкі нанокристалічні шари впливають також на показники міцності та пластичності виробів. Види наноматеріалів наведені на рис. 11.3.

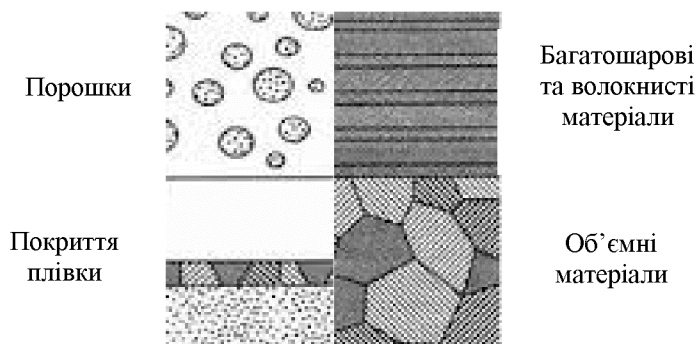


Рис. 11.3. Види наноматеріалів

### Питання для самоконтролю

1. Якою має бути структура сплаву, щоб забезпечити електроопір, вищий ніж у чистих компонентів? Які сплави належать до цієї групи?
2. На які групи поділяються магнітні матеріали? Наведіть приклади таких матеріалів.
3. За якими характеристиками вибирають матеріали для термопар?
4. Які вимоги ставляться до сплавів, що використовуються для постійних магнітів?

5. На які групи поділяються магнітні матеріали за величиною коерцитивної сили?
6. Де використовують магнітом'які та магнітотверді матеріали? Назвіть приклади таких матеріалів.
7. Де використовують сплави з заданим коефіцієнтом теплового розширення? Назвіть такі сплави.
8. На які групи поділяються матеріали високої електричної провідності? Де вони використовуються?
9. Які сполучення хімічних елементів різних груп таблиці Менделєєва утворюють складні напівпровідникові матеріали?
10. В чому полягає ефект пам'яті форми? Де його використовують?
11. Що таке аморфні матеріали та за яких умов вони утворюються? Галузь використання аморфних матеріалів.
12. Які матеріали називаються нанокристалічними, які їх основні властивості?
13. Де застосовуються фуллерени?

## РОЗДІЛ 12

### ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ

У сучасному машинобудуванні широко використовують деталі й різні вироби з порошкових матеріалів.

Технологічний процес виробництва виробів з порошків (порошкова металургія – ПМ) складається з отримання порошків, їх підготовки, формування виробів, спікання і додаткової обробки.

Порошки виготовляють фізико-механічними (дроблення, розмелювання стружки, розпорошення рідкого металу стислим повітрям, грануляція металу в рідину та ін.) або хіміко-металургійними (відновлення металів з оксидів, електролітичне осадження металів з водних розчинів їх солей і ін.) способами. Підготовка порошків до формування включає відпал (для підвищення пластичності порошків), розділення за величиною часточок і змішування.

Формування полягає в наданні заготовкам з порошку форм, розмірів, щільності та механічної міцності, необхідних для подальшого отримання виробів. Його здійснюють пресуванням.

При спіканні неміцні пресовані заготовки перетворюються в міцне спечене тіло, яке за своїми властивостями схоже з безпористими компактними матеріалами. Для конструкційних матеріалів на основі заліза і графіту температура спікання становить 1100 - 1200 °С, для антифрикційних виробів на основі *Fe* – 1000 - 1050 °С, бронзи – 850 - 950 °С. Тривалість спікання становить 0,5 - 1,5 год. в нагрівальних печах в захисній атмосфері або у вакуумі, щоб частинки порошку не окислювалися.

Після спікання для додання високих механічних і технологічних властивостей, підвищення точності розмірів вироби додатково піддають гарячому пресуванню, штампуванню чи прокатуванню.

Для пористих матеріалів передбачають також термічну та хіміко-термічну обробку: гартування, цементацію, нітроцементацію, азотування для підвищення твердості, зносостійкості, міцності та корозійної стійкості поверхневого шару. Іноді застосовують сульфидування і оксидування.

Методами порошкової металургії виготовляють конструкційні, антифрикційні, фрикційні, фільтруючі матеріали, тверді сплави та інші матеріали.

## 12.1 Конструкційні порошкові матеріали

Конструкційні деталі – найбільш поширений вид продукції порошкової металургії. Вартість і трудомісткість їх мінімальні, відходи виробництва майже повністю відсутні. Розрізняють конструкційні порошкові матеріали загального призначення, які замінюють звичайні вуглецеві і леговані сталі, чавуни і кольорові метали, та матеріали, що мають спеціальні властивості – високу зносостійкість, твердість, жароміцність, корозійну стійкість, магнітні та електричні характеристики. Залежно від умов навантаження статичними і динамічними навантаженнями деталі поділяють на мало-, середньо- і важконавантажені, а в залежності від пористості (шпаристості) – на чотири групи за щільністю.

Шпаристість малонавантажених деталей зазвичай становить 16 - 25 %. Їх виготовляють холодним пресуванням і спіканням із залізного порошку з добавкою графіту або з порошків вуглецевих сталей. Середньонавантажені порошкові деталі отримують двократним холодним пресуванням і спіканням з порошків вуглецевих і низьколегованих сталей, а також з залізного порошку з добавкою вуглецю, міді, нікелю. Шпаристість матеріалу 10 – 15 %.

Важконавантажені статичними навантаженнями деталі виготовляють з порошків вуглецевих або легованих сталей і кольорових сплавів. Шпаристість їх не перевищує 9 %. Вироби отримують холодним пресуванням і спіканням з подальшою гарячим і холодним штампуванням або гарячим пресуванням. Шпаристість важконавантажених динамічними навантаженнями деталей з порошків вуглецевих і легованих сталей, сплавів кольорових металів не перевищує 2 %. Для отримання виробів застосовують холодне пресування, гаряче штампування, гаряче пресування або хіміко-термічну обробку.

Для позначення порошкових конструкційних матеріалів прийняте літерно-цифрове маркування. Матеріали на основі порошків заліза, графіту, хрому і т. ін. позначають так: Ж – залізо, Гр – графіт, Д – мідь, Н – нікель, О – олово, М – молибден. Цифри, що стоять після



букв, показують вміст елементів у відсотках, а в кінці марки, після дефісу – щільність матеріалу (г / см<sup>3</sup>). Наприклад, ЖГр0,5-7,3; ЖГр1Д2,5МЗ-7,6; ЖГр0,4Д4НЗ-7,3.

Деталі з порошків сталей марок 12Х13, 14Х17Н2, 10Х18Н10 і 10Х23Н18 отримують одно- та дворазовим пресуванням з наступною гарячою обробкою тиском і застосовують для роботи в агресивних середовищах (шпаристість не більше 3 %). Деталі з порошкових матеріалів застосовують для виготовлення кришок, шайб, кілець, втулок, кулачків, важелів, поршневих кілець, фланців, підшипників, деталей насосів, друкарських машинок та ін.

Конструкційні матеріали на основі кольорових металів і сплавів виготовляють з порошків алюмінію, магнію, берилію, міді, нікелю, бронзи, латуні, титану, хрому та ін. Перспективно використання порошків титану і його сплавів для важконавантажених деталей. Високі механічні властивості порошкових виробів на основі титану ( $\sigma_s = 650 - 900$  МПа;  $\delta = 8 - 16$  %) дозволяють застосовувати їх для шатунів автомобільних двигунів. Це істотно зменшує масу, знижує інерційні сили і збільшує потужність двигуна. Деталі з порошків титану (втулки, кришки, труби) знаходять застосування в хімічному та харчовому машинобудуванні,

## 12.2 Призначення і категорії за видами застосування

Метод порошкової металургії в останні роки широко увійшов в усі сфери техніки. З його допомогою виробляють різні матеріали, що мають унікальні функціональні характеристики. Сьогодні з них виготовляються конструкційні елементи машин і механізмів, металорізальний і породоруйнуючий інструмент, підшипники та інші компоненти вузлів тертя, деталі електротехнічного обладнання та оснащення атомних реакторів, магніти, охолоджувачі випаровувального типу, безліч інших незамінних виробів промислового призначення. Повсюдне поширення отримав останнім часом також спосіб нанесення на металеві поверхні захисних покриттів шляхом напилення і наплавлення.

Технологічними досягненнями в сфері ПМ обумовлено створення порошкової продукції виняткових функціональних якостей, при найбільш вигідних економічних характеристиках, які сприяють ресурсо- та енергозбереженню. В останні роки ПМ розвивається

особливо бурхливо в плані розробки як інноваційних технологій, так і новітніх порошкових матеріалів.

Сучасні порошкові матеріали за видами застосування умовно поділяють на такі функціональні категорії:

- конструкційні (включаючи групи металів і їх сплавів, металокерамічних твердих сплавів і мінералокераміки);
- пористі (або шпаристі, включаючи групи фільтруючих, трибо-технічних, так званих «потіючих» та піноматеріалів);
- електротехнічного призначення;
- спеціальні матеріали для ядерної енергетики і ін.

Всі вони по-своєму затребувані, а тому потребують більш детального розгляду.

### 12.3 Конструкційні порошкові матеріали

Конструкційними називають матеріали металевого, неметалевого і композиційного генезу, які поєднують в собі комплекс властивостей, що забезпечують можливість застосування в машинобудівних галузях для виробництва найбільш відповідальних вузлів і агрегатів.

Порошкові матеріали конструкційного призначення – найпоширеніша продукція ПМ. Потреба в них сьогодні досягає 65 % загальної затребуваності. Володіючи набором високих механічних характеристик, вони повсюдно використовуються в машинобудуванні для виробництва високонавантажених шестерень, зірочок, зубчастих коліс, черв'ячних пар, клапанів і сідел до них, муфт, фланців, ексцентриків, накладок, заглушок, храповиків, гайок, обмежувачів, кулачків, шайб, кришок, корпусів підшипників, компонентів насосного обладнання і вимірювального інструменту, різних дисків, втулок, деталей безлічі інших елементів технічних пристроїв. Деякі з таких виробів можна бачити на рис. 12.1.

Основною вимогою, що пред'являється до матеріалів даної категорії, є поєднання підвищених фізико-механічних властивостей і економічності. Вироби з конструкційних матеріалів поділяються на малонавантажені, середньонавантажені і високонавантажені, а за типом матеріалу – продукцію на основі чорних (сталі/чавуни), кольорових (сплави *Al*, *Mg*, *Ti*, *Cu* і ін.) і тугоплавких металів (*W*, *Mo*, *Nb*, *Ta* і ін.), а також отриману з твердих сплавів металокерамічного

генезу, безметалевої порошкової кераміки і композитних армованих матеріалів.



Рис. 12.1 Зразки продукції з порошкових матеріалів конструкційного призначення

Правильність вибору конструкційних матеріалів напряму залежить від того, наскільки вірно враховані особливості їх застосування в технологіко-економічному та експлуатаційному аспектах, останній з яких обумовлений наявністю відповідного хімічного складу і необхідних фізико-механічних властивостей.

До фізико-механічних властивостей, що залежать від внутрішньої структури і хімічного складу матеріалу, відносять значення: міцності; щільності; твердості; тепло-електропровідності; теплоємності; температури плавлення; пластичності, в'язкості, пружності; крихкості.

До технологічних властивостей, які визначають ступінь здатності матеріалу піддаватися термомеханічній обробці, відносять значення: здатності деформуватися (ковкості); зварюваності; оброблюваності різанням і тиском; оброблюваності термічними способами; оброблюваності методами лиття.

До експлуатаційних (службових) властивостей, затребуваних в тих чи інших робочих умовах, відносять значення: опору зношуванню; стійкості до дії корозії; стійкості до температурних факторів (холодостійкості, жаростійкості, жароміцності і т.п.).

**Конструкційні металеві матеріали.** За ознакою технологічного виконання матеріали даної групи поділяються на підгрупи деформівних, ливарних і спечених, що й відображається в їх маркуванні.

*Чорні метали – сталі і чавуни.* Сталі – це полікомпонентні залізовуглецеві сплави з концентрацією вуглецю до 2,14 %. Сталі можуть бути вуглецевими (низьковуглецевими при концентрації  $C \leq 0,3 \%$ , середньовуглецевими при  $C \leq 0,6 \%$ , високовуглецевими при  $C > 0,6 \%$ ) або леггованими (низьколеггованими з сумарною концентрацією легуючих елементів  $\leq 2,5 \%$ , середньолеггованими, відповідно, 2,5 - 10 %, високолеггованими, відповідно,  $> 10 \%$ ; розділ 4).

Чавуни – це полікомпонентні залізовуглецевих сплави з концентрацією С > 2,14 %, які при затвердінні утворюють евтектику. Чавуни прийнято класифікувати за ступенем їх графітизації. В рамках даної класифікації розрізняють класи білих чавунів, графітизованих чавунів (сірих – СЧ, високоміцних – ВЧ, ковких – КЧ), а також так званих половинчастих чавунів з відбіленою поверхневою та внутрішньою структурою (розділ 5).

У табл. 12.1 наведені дані про найбільш затребувані марки чорнометалевих конструкційних порошкових матеріалів (ГОСТ 28378-89) та галузі їх практичного використання.

Таблиця 12.1. Загальні характеристики та призначення деяких конструкційних порошкових матеріалів на чорнометалевій основі

Марка	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	КСУ, Дж/м <sup>3</sup>	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	НВ		Галузь застосу- вання	Матеріал, що замінюють
						МПа	кгс/ мм <sup>2</sup>		
	не менше						не менше		
Ж10-66	6,6	170	15	5,0	200	45	450	Мало- та середньо- навантажен і конструк- ційні деталі	Вуглецеві сталі
Ж10-72	7,2	200	25	9,0	-	55	560		
Ж10-75	7,5	230	40	20,0	-	65	660		
Ж10Д3-66	6,6	260	6	4,0	300	65	650	Середньо- наванта- жені конструк- ційні деталі	Вуглецеві якісні конструк- ційні сталі Леговані, якісні та вуглецеві сталі 20,30, 40,45,50, 20Х
Ж10Д3-70	7,0	340	-	7,0	-	90	900		
Ж50НЗД2-66	6,6	320	3	3,0	-	100	1000		
Ж50НЗД2-70	7,0	440	-	4,5	-	130	1300		
Ж40НЗД2Х- 66	6,6	800	-	1,0	-	180	1800		
Ж20Х2-76	7,6	850	50	4,0	115 0	250	2500	Важкона- вантажені конструк- ційні деталі	20ХН3, 40Х
Ж10Х18Н9- 68	6,8	400	-	12,0	-	-	-	Конструк- ційні деталі, які працюють в умовах підвищеної корозії	Корозійно стійкі сталі
Ж10Х23Н18- 66	6,6	350	-	18,0	-	-	-		
Ж30Х7-76	7,6	800	10	2,0	-	-	-	Абразивно- стійкі та важконаван- тажені дет.	40Г2

До розряду конструкційних сплавів кольорових металів відносять (згідно найменуванню основного компоненту) групи алюмінієвих, магнієвих, мідних, титанових і деяких інших сплавів. У свою чергу, їх поділяють на легко- металеві й важкометалеві сплави, питома вага яких становить, відповідно,  $\leq 4505 \text{ кг/м}^3$  і більше  $4505 \text{ кг/м}^3$ . До класу легких належать сплави на основі *Al*, *Mg*, *Ti*, до класу важких – на основі *Cu*, *Cu-Ni*, *Cu-Zn* (латуні), *Cu-Sn* (олов'яністі бронзи), *Sn-Pb* (бабіти), а також благородних *Au*, *Pt* і *Ag*.

*Тугоплавкі метали* – клас хімічних елементів (металів), які характеризуються дуже високою температурою плавлення і зносостійкістю.

До класу тугоплавких належать елементи 5 періоду Періодичної таблиці – *Nb* і *Mo*; а також елементи 6 періоду – *Ta*, *W* і *Re*. Температура плавлення кожного з них перевищує  $2010^\circ\text{C}$  при відносній хімічній інертності та високих параметрах щільності, що слугує найважливішим показником до промислового застосування в багатьох виробничих галузях.

*Ерозійностійкі металеві матеріали*. Ця група металевих матеріалів володіє набором властивостей, отримання яких в сплавах не виявляється можливим. Їх виробляють на основі чистих тугоплавких металів або вуглецю в формі композицій, зокрема, просочуючи каркас з вольфраму або вуглецю розплавами *Cu/Ag*. Компоненти механізмів з матеріалів, стійких до ерозії, можуть функціонувати в режимі температур, що перевищують  $2600^\circ\text{C}$ . В процесі роботи *Cu(Ag)* випаровуються, завдяки чому знижується інтенсивність тепловитрати, що тягне за собою поліпшення умов експлуатації вольфрамової або вуглецевої каркасної матриці.

У міру збільшення сполучних межзеренних сил зростають витрати на виготовлення кінцевої продукції, проте знижується ступінь ймовірності впливів на матеріал негативних факторів з боку зовнішнього середовища і мінімізуються витрати на захисні заходи. Порошки, що виступають в ролі вихідних компонентів для ПМ, у цьому плані залишаються наче на проміжному ступеню між фазами рідини й твердого тіла, володіючи, в загальному обсязі зерен, властивістю плинності, а в складі кожного з окремих зерен – здатністю до деформування.

Ось чому група ерозійностійких матеріалів поєднує в собі широкий набір корисних якостей, які стабілізують їх робочі

характеристики в екстремальних експлуатаційних режимах. Наочне тому підтвердження – турбіни, де чи не найбільш навантаженим компонентом є виконуваний з ерозійностійкого матеріалу вкладиш сопла, безперебійно функціонує в діапазоні поверхневих робочих температур 3550-3650 °С.

До категорії конструкційних порошкових матеріалів відносяться й керамічні (спечені), які поділяються, у свою чергу, на металокераміку і мінералокераміку.

***Конструкційні металокерамічні матеріали.*** До даної групи конструкційних матеріалів відносяться металокерамічні тверді сплави (кермети), які відрізняються складною структурою та містять в своєму складі більше 50% (за обсягом) твердозернистої фази (карбіди, борида, оксиди, нітриди різних металів), та в якості матриці для утримання зерен пластичне сполучне у вигляді чистих металів (нікель, кобальт, тугоплавкі метали). Кермети застосовують для виробництва активних компонентів металорізального, штампувального, бурового інструменту.

Металокерамічні тверді сплави – один з найбільш поширених класів конструкційних порошкових матеріалів, в ході отримання яких потенціал порошкових матеріалів реалізується у всій його широті, оскільки мова йде про створення методом безвідходної технології складноструктурних з'єднань компонентів з різко відмінними значеннями температури плавлення і унікальним набором фізико-механічних властивостей. Тверді сплави знаходять застосування в інструментальному виробництві, ковальсько-пресо-штампувальному та буровому обладнанні. Показники щільності керметів (кераміки з матричним металевим сполучним) досягають 3,97 г/см<sup>3</sup>, а твердості (HRA) – 93 од.

Тверді сплави абсолютно незамінні при виготовленні металорізального та контрольно-вимірювального інструменту, функціональних вставок волочильних філь'єр, прес-штампувальних матриць і пуансонів. У сфері легкого, середнього і важкого машинобудування широко використовуються деталі з твердосплавним армуванням. Так, в текстильній галузі застосовують твердосплавні напрямні кільця та інші тертьові компоненти; в сфері порошкової металургії з твердих сплавів виготовляють розмельні кулі для кулових млинів і деталі для оснащення ливарних пресів.

*Високотемпературні конструкційні матеріали.* До розряду високотемпературної порошкової металокераміки, одержуваної в більшості випадків тільки методами порошкової металургії, належать сплави на базі жаростійких металів (*W, Mo, Nb, Ta, Zr, Re, Ti*).

Виробництво виробів з жароміцних конструкційних матеріалів багато в чому визначає темпи подальшого розширення кола експлуатаційних можливостей сучасних систем і агрегатів для космічної, авіаційної, суднобудівної, електротехнічної, радіоелектронної, хімічної та верстатобудівної промисловості, що не представляється можливим без забезпечення спеціальних функціональних властивостей, серед яких одним з найважливіших є саме термостійкість.

*Конструкційні мінералокерамічні матеріали.* Підвищення параметрів твердості заготовок, що піддаються обробці, викликало необхідність розширити діапазон застосовуваних ріжучих матеріалів від твердосплавних до мінералокерамічних та інших надтвердих з'єднань, одержуваних за допомогою порошкової металургії.

Мінералокерамічні матеріали – група неорганічних безметалевих сполучень, що мають вагомні переваги в порівнянні з групами металів і керметів. Вони характеризуються оптимальними співвідношеннями параметрів міцність/щільність і жорсткість/пружність, а також стійкість до корозії поряд з неперевершеними показниками міцності при експлуатації в високо-температурному режимі.

Мінералокераміку, яка структурно включає до свого складу кристаліти, з'єднані склоподібним аморфним сполучним, отримують переважно на основі порошкових оксидів і високотвердих безоксидних карбідних, боридних, нітридних та силіцидних тугоплавких композицій, а також подібних з'єднань *Al, Ti, Zr* та ряду інших металів. Мінералокерамічні матеріали є високоміцними, термостійкими, зносостійкими. Мінералокераміка має щільність в діапазоні 4,2 - 4,6 г/см<sup>3</sup> і твердість в межах 92-94 HRA.

Мінералокерамічні матеріали за марками умовно поділяють на 3 групи:

- оксидна, що складається з оксидів *Al, Ti* (99,2 %) з незначними домішками оксиду *Mg* та інших хімічних елементів. До цієї групи належать марки ВО-13, ЦМ-332, ВШ-75;

– оксидно-карбідна з оксиду  $Al$  (61 - 80 %), а також карбідів і оксидів тугоплавких металів. До неї належать марки В0-3 і В0К-60 (ГОСТ 25003-81);

– нітридна з нітридів  $Si$  (до 97,1 %) і тугоплавких мінералів з добавками оксиду  $Al$  і ряду інших включень. До неї належать кортиніт ОНТ-20 і силініт-Р.

Властивості мінералокерамічних матеріалів регламентуються ГОСТ 50151-92.

Мінералокераміку найчастіше застосовують з метою виготовлення робочих компонентів ріжучого інструменту, яким здійснюють напівчистову і чистову обробку (в режимі безударних навантажень і швидкостей обробки до 8100 мм/хв. на неінтенсивних подачах) сталей вуглецевої і легованої груп (включаючи загартовані і поліпшені), а також чавунів, кольорових і тугоплавких сплавів.

Металокераміку для різального інструменту виконують у формі змінних пластинок, за конфігурацією схожих з твердосплавними аналогами (рис. 12.2). Такі пластинки відрізняються високими значеннями термостійкості (1210-1410 °С), показників твердості (30010-33010 МПа), зносостійкості і стійкості до дії агресивного хімічного середовища, що обумовлює можливість високошвидкісної обробки.

У порівнянні з твердосплавними, мінералокерамічні пластини забезпечують можливість обробки чорнометалевих заготовок при вдвічі більш інтенсивному швидкісному режимі. До того ж, оскільки мінералокераміка є майже не спорідненою до металів, при їх обробці інструментами з даних матеріалів практично виключений ризик злипання з робочою поверхнею.



Рис. 12.2. Металокерамічні пластинки для різального інструменту

До групи мінералокераміки відносять також корунд. Корунди незамінні при виготовленні зносостійких насадок до ґрунторуйнуючих долот гідромоніторного типу, насосних горловин, нитковедних пристроїв ткацького обладнання. Застосовують корунди й в електро-технічній галузі при виготовленні



компонентів гіроскопових підшипників. Вельми результативним виявляється використання корундів для виготовлення робочих кромок ґрунтопланувальних машин.

**Композитні дисперснозміцнені та металоволоконні матеріали.** Полікомпонентні конструкційні матеріали, які структурно є композиціями з пластичною матричною основою, армованою метало-волоконними або дрібнодисперсними наповнювачами, так і називають композитами.

Об'єднання в одне структурне ціле хімічних елементів з різними наборами властивостей обумовлює отримання інноваційного матеріалу, що володіє набором експлуатаційних характеристик, які в кількісному і якісному відношенні в рази перевищують аналогічні параметри кожного з окремих компонентів. Більшість композитів за своїми фізико-механічними властивостями вигідно відрізняються від традиційних конструкційних матеріалів, являючись при цьому, що важливо, набагато більш легкими. Застосування композитних матеріалів дозволило мінімізувати вагу і габарити конструкцій при порівнянних або навіть кращих функціональних параметрах.

Вихідним матеріалом металевої матриці зазвичай служать *Al*, *Mg*, *Ni* та їх сплави, в якості армуючого компоненту використовуються матеріали у вигляді волокон або порошків з дрібнозернистих (тонкодисперсних) термостійких частинок, не схильних до розчинення в металі матриці (дисперсно-армовані матеріали). Метало-матриця зв'язує армоволокна (дисперсні зерна) в єдиний міцний моноліт. Подібні композити можна отримати шляхом просочення волоконних пучків металевими розплавами, або міксації і наступного спікання матеріалу металевої основи з дрібнозернистим порошковим наповнювачем. На рис. 12.3 схематично проілюстровані композиційні матеріали з металевою матрицею та наповнювачем, який визначає структуру.

Дисперсноармовані металокомпозити за функціональною ознакою є ізотропними, які мають набір властивостей, однаково поширюваних в усіх напрямках. Додатки 6-12% армуючих наповнювачів (тугоплавких оксидних, нітридних, боридних, карбідних порошків) дозволяють істотно підвищити опірність матричного каркасу різноплановим навантажувальним впливам, збільшити

ступінь термостійкості композитного з'єднання в порівнянні з вихідною матрицею.

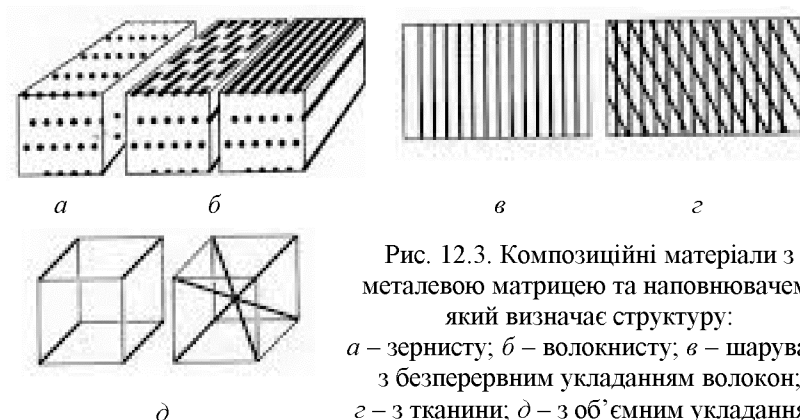


Рис. 12.3. Композиційні матеріали з металевою матрицею та наповнювачем, який визначає структуру:  
*a* – зернисту; *б* – волокнисту; *в* – шарувату з безперервним укладанням волокон;  
*г* – з тканини; *д* – з об’ємним укладанням

Дісперснозміцнювані композитні матеріали з метало-матрицею виготовляють шляхом введення порошку наповнювача в металевий розплав або методами ПМ. Композити з волокнистим армонаповнювачем за принципом зміцнення поділяють на переривчасті, з приблизно рівним співвідношенням довжини та діаметра волоконних ниток, і недискретні, з волокном безперервної структури. При цьому діаметр волоконних ниток може варіюватися в широких межах (від десятих часток до декількох сотень мкм). Чим більшим значенням виражається співвідношення довжини волоконних ниток до їх діаметру, тим вище буде міцність композиту.

Композити, на відміну від всіх інших конструкційних матеріалів, мають підвищені на 55-95% показники граничної опірності, пружності, жорсткості і знижену схильність до розтріскування. Використання композитів дозволяє збільшити конструкційну жорсткість і мінімізувати металоємність виробленої з них кінцевої продукції. Набір корисних якостей композитоволоконних матеріалів визначається властивостями волокна; основна ж функція матриці полягає в перерозподілі напружуючих сил між нитками. Ось чому показники міцності, пружності волокон повинні істотно не перевищувати аналогічні параметри матричного каркасу. Жорсткі армоволокна, демпфірують навантажувальні напруги, що виникають в

композиції, підсилюють властивості міцності ниток, розподіляючи їх відповідно напрямку, в якому нитки орієнтовані.

Для армування матриць на базі *Al* і *Mg* застосовують карбідонітридо-, боридо- та оксидоволокна, що мають високі значення коефіцієнту міцності і модуля пружності. Досить часто в якості армоволокна використовується тонкий сталевий дріт. Армування титаноматричних композитів виконується із застосуванням дроту з *Mo*, а також сапфірових, кремнієборидних і титанокарбідних волокон. Підвищити значення термостійкості нікелево-матричних композитів вдається шляхом армування дротом з *W* або *Mo*. Металоволоконні композити є затребуваними й тоді, коли необхідно домогтися високих значень тепло- електропровідності.

Композити на металічній основі при високих значеннях механічної і жароміцності, одночасно є малопластичними, що сприяє мінімізації руйнувань тріщинного і крихкісного генезу. Композитні дисперсно- і волоконноармовані конструкційні матеріали широко застосовують в ракето-, авіа-, судно-, автобудуванні, багатьох інших машинобудівних галузях.

## 12.4 Пористі порошкові матеріали

Характерна особливість даної категорії порошкових матеріалів полягає в наявності в них великої кількості пор, рівномірно розподілених по всьому об'єму, що дає можливість забезпечення необхідних функціональних характеристик. За основними властивостями пористі матеріали можна поділити на підкатегорії: фільтруючі, капілярні.

Пористі матеріали відрізняє різноманітність фізико-хімічного складу вихідної сировини і застосовуваних виробничих технологій, за якими вони виготовляються. Цим обумовлений широкий діапазон значень ступеня пористості, який може варіюватися в межах від 2-3 % до 95-98 %. Ступінь пористості істотно впливає на прояв структурних, фізичних, технологічних і експлуатаційних властивостей кінцевої продукції з даних матеріалів. На комплекс функціональних характеристик, яким володіють ті чи інші пористі вироби, крім цього, впливають фактори форми, стану поверхні і розподілу зерен вихідних порошків у всьому обсязі по розмірними параметрами.

До категорії пористих відносять класи фільтруючих, пінистих «тих, що потіють» та триботехнічних порошкових матеріалів.

**Фільтруючі пористі матеріали.** Пористі фільтри (ступінь пористості 45-55 %), що застосовуються для механічного очищення різних рідин і газів від частинок сторонніх включень, складають значну частину продукції, що випускається з пористих порошкових матеріалів. Вони виготовляються методом формовки (формопресування з різними зусиллями або вільна засипка в форми) з наступним спіканням бронзового, нікелевого, титанового, вольфрамового, молибденового порошку, а також порошків нержавіючих сталей і тугоплавких композицій. Робочий температурний діапазон становить від  $-270$  до  $+1000$  °С. Методами порошкової металургії в числі інших виготовляють фільтруючі елементи, ступінь пористості яких, а значить, і очищувальну здатність, можна змінювати і навіть регулювати залежно від конкретних завдань (рис. 12.4).

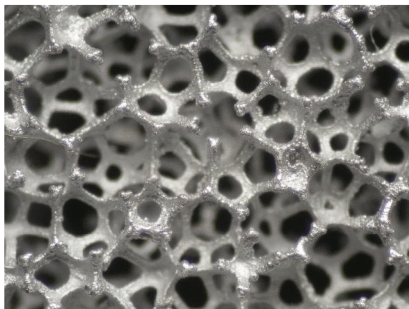


Рис. 12.4. Структура пористого фільтру під мікроскопом

Визначальними критеріями якості пористих фільтрувальних матеріалів є: характер пористості; ступінь проникності; тонкість очищення; капілярність.

*Характер пористості.*

Розрізняють пористість зовнішню (відкриті пори) і внутрішню (закриті пори). При цьому в зовнішній пористості проявляється поєднання пор наскрізного і непрямого (тупикового) характеру. Ступенем наскрізної пористості

визначається інтенсивність пропускного потоку середовища, що очищується – критерій, який називають швидкістю очищення.

*Ступенем проникності* називають показник, що визначає пропускну здатність фільтруючого елементу і виражається кількісним значенням інтенсивності потоку, що фільтрується, та проходить за одиницю часу через одиницю робочої площі при стабільній силі тиску. Ступінь проникності збільшується в міру зростання ступеня

пористості та кількості наскрізних зовнішніх пір в порівнянні з кількістю тупикових.

*Тонкість очищення* (фільтрації) – показник, який кількісно характеризує якість процесу очищення фільтрованого середовища від сторонніх включень (забруднень). Загальна очищувальна здатність фільтра визначається співвідношенням значень абсолютної і номінальної тонкості фільтрації, а також коефіцієнтом повноти очищення.

Абсолютною тонкістю фільтрації називають значення величини показника найбільшого розміру забруднюючих частинок, що пропускаються крізь фільтр, а номінальною тонкістю – їх найменшого розміру. Коефіцієнт повноти очищення характеризує кількісне значення зменшення маси забруднень у середовищі, що фільтрується, при її одноразовому пропусканні крізь фільтруючий елемент.

Критерій *капілярності* характеризує в кількісному вираженні особливості процесу взаємодії пористого фільтруючого елемента з очищувальним середовищем. Величина потенціалу капілярності (для рідин) визначається добутком найбільшої висоти, на яку здатна піднятися рідина в даному пористому тілі, на величину прискорення вільного падіння.

Фільтруючі елементи, що спікаються, виготовляють з металопорошків однорідної дисперсії і необхідного хімічного складу. Зерна при цьому можуть за своєю формою бути сферичними та несферичними. Найважливішою перевагою фільтруючих елементів з несферичних порошків є підвищена механічна міцність, що досягається завдяки більш щільному взаємодіюванню зерен довільної конфігурації, ніж у сферичних порошків, округлі зерна яких можуть вступати лише в точковий контакт. Проте, спечені пористі фільтри найчастіше виготовляють зі сферичних порошків, оскільки такі вироби характеризуються набагато більшим ступенем проникності, піддаючись, до того ж, регулюванню та відновленню.

Порошкові фільтри мають цілий ряд переваг перед не порошковими аналогами, серед яких основними є: нескладне виготовлення; підвищена міцність; кращі очищаючі властивості; високі значення жаростійкості, теплопровідності, опору абразивному зносу; рівномірний розподіл фільтрації по всій площі фільтруючого елемента.

За формою фільтруючі елементи зі спечених порошкових матеріалів можуть являти собою диски, пластинки, циліндри, втулки, конуси і фасонні вироби більш складної конфігурації (рис. 12.5).



Рис. 12.5. Порошкові пористі фільтруючі елементи

Для виготовлення бронзових фільтрів застосовують, переважно, порошки зі сферичністю зернами, які отримують розпиленням розплаву. Температура спікання заготовок може бути в межах  $855 - 955^{\circ}\text{C}$  при тривалості процесу 35 – 65 хв. З бронзових порошків великої дисперсії

(діаметром зерен  $55 - 135\text{ мкм}$ ) виготовляють фільтри, за допомогою яких здійснюють грубу очистку; з дрібнодисперсних порошків (діаметром зерен  $1,8 - 30,5\text{ мкм}$ ) – фільтри, здатні здійснювати тонку очистку. Використання бронзових фільтрів поширене в безлічі промислових галузей. З їх допомогою очищають від сторонніх часток розмірами  $4,5 - 210\text{ мкм}$  паливно-мастильні матеріали для двигунів внутрішнього згоряння і двигунів на реактивній тязі, різні гази і кислото-лужні середовища, парафінові розплави і т.д.

Нікелеві пористі фільтри виробляють (шляхом формування – спікання в температурному режимі  $1050 - 1150^{\circ}\text{C}$ ) з порошків, що мають електролітичне або карбонільне походження. Крім фільтруючих елементів, з них виготовляють також групу пористих електродів для нікель-кадмієвих та лужних акумуляторів.

Широко затребуваними є порошкові фільтри з нержавіючих сталей, які, в порівнянні з нікелевими, більш стійкі до корозії, маючи, до того ж, меншу вартість. Первинні заготовки виробляють формопресуванням або прокатуванням, після чого спікають протягом 2,5-3,5 год. при  $1210-1255^{\circ}\text{C}$ . Для виробництва таких фільтрів використовуються порошки сталей марок X17H2, X18H9, X30 і т. ін.

Фільтри даного типу застосовуються в металургії: з їх допомогою очищають від механічних домішок рідке лиття, гарячі доменні та мартенівські гази. Нерідко їх використовують в якості протипожежної перешкоди на ділянках автогенного зварювання та обробки металів газополуменевим методом, а також в ємностях для легкозаймистих і вибухонебезпечних рідин.

Титанові пористі фільтри виготовляють з порошків карбонільного генезу, діаметр зерен яких не перевищує 61 мкм (із застосуванням наповнювача), а в деяких випадках – з електролізного порошку з діаметром зерен до 1,2 мм (наповнювач не застосовують). Спікання здійснюють в спеціальних газових середовищах при 955 - 1155 °С протягом 1,6-2,6 год. Затребуваність пористих титанових фільтрів пояснюється наявністю таких корисних функціональних якостей, як висока стійкість проти корозії при фільтруванні агресивних рідин і газів в поєднанні з високою питомою міцністю. Значення тонкості фільтрації для фільтрів з пористого *Ti* може становити  $\leq 5,2$  мкм.

Технологія виробництва спечених пористих фільтрів в кожному випадку є вибірковою. Залежно від особливостей умов фільтрації враховують необхідні значення тонкості очищення, ступеня проникності, пропускної здатності, міцності і розмірних параметрів. Фільтри, розміри яких невеликі, виготовляють, спікаючи вільно засипаний в форми вихідний порошок. Форми піддають постійній вібрації, щоб вміст рівномірно розподілявся по всьому їх об'єму. При цьому сферичність і розміри частинок зберігаються, що обумовлює найвищу ступінь проникності матеріалу. Традиційним методом виробництва спечених пористих фільтрів є деформування порошку пресуванням. Для виготовлення фільтрів високого ступеня пористості (55-76%) і підвищених характеристик міцності до складу порошкової шихти вводиться ряд спеціальних добавок, які забезпечують посилення міцності без шкоди для пористості.

Сьогодні пористі фільтруючі елементи застосовуються повсюдно. Їх використовують на всіх промислових підприємствах з метою недопущення шкідливих викидів в атмосферу, для очищення природних і стічних вод, на АЕС і теплоелектростанціях. Корозійностійкі фільтри застосовують для очищення кислото-лужних розчинів, питної води і т.д.

*Пористі матеріали, що «потіють».* Такими вважають пористі матеріали, крізь пори яких до функціональної зовнішньої поверхні виробу примусово (під певним тиском) подаються робочі рідини або гази. За рахунок ефекту випаровування поверхня охолоджується.

Можливості застосування матеріалів, що «потіють», з метою регулювання температури поверхонь надзвичайно широкі. Продукція

з них може використовуватися при створенні умов як для недопущення перегріву, (зокрема, турбінних лопаток), так і для вирішення проблем протилежного характеру, коли, наприклад, крила літака або лопаті підйомного вертолітного гвинта покриваються шаром «потіючого» мідно-нікелевого матеріалу, крізь пори якого просочуються дрібні крапельки антифризу, що рівномірно розтікається по всій площі поверхні і зводить нанівець ефект обмерзання. При цьому витрата антифризу знижується мало не наполовину.

Поверхнєве випаровувальне охолодження із застосуванням «потіючих» матеріалів – чи не найефективніший спосіб зниження температури технічних пристроїв, які цього потребують, елементів будівельних конструкцій, інших об'єктів господарського призначення. Науково доведено і експериментально підтверджено той факт, що охолодження випаровуванням більш продуктивне, ніж те, що здійснюється в рівноцінних системах по конвекційному або плівковому принципам. Так, використання парових турбін із лопатками, охолоджуваними за допомогою «потіючих» матеріалів, забезпечило можливість підвищення температури робочого пару з 845 до 1250 °С і збільшення корисної потужності на 15-20 %.

Ступінь проникності матеріалів з «потіючої» металокераміки прямо пропорційна ступеню їх пористості та силі тиску, під яким подається холодоагент. Виготовляються вони на базі порошків *Cu*, *Ni*, ніхромів і нержавіючих сталей з порами, діаметр яких може досягати 9,5 - 12,5 мкм при ступені пористості до 35 %. Кінцева продукція з них (листи, смуги, стрічки, конуси, втулки і т.д.) отримується шляхом пресформування або прокатки і наступного спікання заготовок.

*Теплові труби з пористих матеріалів.* Широку популярність в промисловій сфері знайшли також пористі порошкові матеріали, які називають капілярно-пористими. У них робоча рідина також транспортується до зовнішньої поверхні крізь порові канали, але вже не примусово, а під впливом природних капілярних сил, оскільки діаметр капілярних пор в рази менший в порівнянні з діаметром пор «потіючих» матеріалів. З появою матеріалів капілярно-пористої структури з'явилася можливість створення виробів, проникних для одних рідинних середовищ і непроникних для інших, із здійсненням в капілярах пор фазових перетворень, які супроводжуються



теплопоглинанням або, навпаки, виділенням тепла. Наявність даних властивостей зумовило застосування капілярно-пористих матеріалів в самих різних технічних галузях, наприклад, в конструкційних елементах теплообмінної апаратури.

Одним з найбільш перспективних напрямків в цьому аспекті стало створення так званих теплових труб, здатних стабілізувати термополе в установках різного призначення і забезпечити наявність оптимальних ізотермічних умов для обробки різних заготовок (рис. 12.6).



Рис. 12. 6. Теплові труби з пористих матеріалів

Так, застосування низькотемпературних теплових труб, які використовуються в електротехніці для того, щоб охолоджувати ротори, статори електродвигунів і електрогенераторів, а також обмотку трансформаторних осердь, забезпечило підвищення їх показників потужності майже в півтора рази. Все частіше застосовуються теплові труби з метою охолодження важких високовольних автоматів змикання-розмикання ланцюгів. Теплові труби, поряд з паровими камерами, мають істотні переваги перед традиційними елементами, що передають тепло у вигляді, наприклад, теплообмінників циркуляційного типу: в них відсутні рухомі деталі, в роботі вони не створюють шуму і не потребують витрати електроенергії на перекачування теплоносія з конденсаційної в випарну зону, мають невелику масу і відрізняються незначним термоопором.

**Високопористі піноматеріали.** Піноматеріали – матеріали високого ступеня пористості (95,5-98,5 %), який зумовлює малі значення їх щільності. Наприклад, щільність піно-вольфраму вшестеро менше, ніж щільність вольфраму. Такі матеріали мають пінопластову основу (на базі полівінілхлоридів, полістиролів і т.п.), армовану міцним металоволокном. Використовують їх, головним

чином, як легкі теплоізоляційні наповнювачі в авіабудівній, суднобудівній галузях.

## 12.5 Триботехнічні пористі матеріали

Триботехнічними (від грецького «трибос» – «тертя») називають пористі матеріали, що використовуються для виготовлення пар тертя. Група триботехнічних матеріалів, в свою чергу, поділяється на підгрупи антифрикційних матеріалів, що забезпечують найменший опір при взаємодії поверхонь, що труться, і фрикційних матеріалів, які, навпаки, застосовуються з метою зробити силу тертя максимальною.

Проблема тертя і супутнього йому зношення перебуває в центрі уваги інженерів-матеріалознавців не тільки в силу різноманіття проявів цього явища, але і його великого практичного значення у всіх виробничих сферах.

*Триботехнічні характеристики матеріалів.* Зношування – процес, що полягає в відділенні частинок матеріалу з поверхні виробу, з якого вона виготовлена, а також накопичення деформаційних наслідків, що поступово приводить до зміни форморозмірів. Знос – результат зношування, що обчислюється конкретними величинами (довжина, об'єм, маса і т.п.).

Зносостійкість – характеристика матеріалу, що виявляється в його опірності зношуванню в тих чи інших обставинах тертя, що обчислюється величиною, зворотною швидкості зношування.

Припрацьовуваність (обкатка) – здатність поверхонь, що труться, до поліпшення шляхом взаємозглажування своїх контактних характеристик в початковому періоді тертя, супроводжувана зменшенням коефіцієнта тертя, і, як наслідок, уповільненням зношування і зниженням тепловиділення. Краща припрацьовуваність спостерігається у матеріалів, менш стійких до зносу, а отже, щоб поліпшити припрацьовуваність, на зносостійкій поверхні, що труться нерідко наносять шар спеціального матеріалу.

*Вплив пористості матеріалів на триботехнічні характеристики.* Триботехнічні характеристики матеріалів підлягають регулюванню шляхом підвищення або зниження коефіцієнта тертя. Пори є своєрідними резервуарами, які заповнені змащувальним компонентом, який витискається з об'єму матеріалу в міру зношення і

надходить у зону тертя для регенерації мастильної плівки. Самовитискання змащувального компонента здійснюється також в міру фрикційного нагрівання та теплового розширення матеріалу. З охолодженням надлишок мастила знову вбирається пористим шаром.

**Антифрикційні пористі матеріали.** Пористі антифрикційні матеріали (ГОСТ 26614-85) виготовляють методом формопресування з подальшим спіканням з металевих порошків на основі *Fe*, *Cu* і *Ti*, а також боридних, карбідних і оксидних композицій із змащувальним просоченням зі свинцю, графіту, дисульфиду молібдену, сірчастого цинку, селенідів, фторопластів та інших м'яких наповнювачів. Ступінь пористості таких матеріалів може бути різною (15-35 %). Зразки виробів з таких матеріалів наведені на рис. 12.7.

Більшість виробів з порошкових антифрикційних матеріалів – самозмащувальні (змащувальний компонент міститься в порах матричної основи). Оптимальну структуру антифрикційних матеріалів у вигляді твердої матричної основи з заповнюючим її м'яким змащувальним компонентом можливо отримати лише із застосуванням методу ПМ. Продукція, що виготовляється

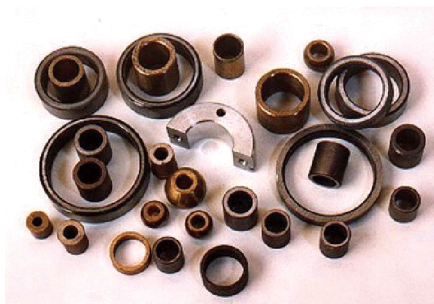


Рис. 12.7 Зразки виробів з антифрикційних матеріалів

таким чином, здатна забезпечити стабільно малі показники тертя завдяки ідеальній припрацьовуваності, високим характеристикам зносостійкості та теплопровідності, оптимальної в'язкості в режимі ударних навантажень і спротиву схоплюючому ефекту. Дані матеріали застосовуються як для виробництва деталей просторової конфігурації, так і у вигляді функціональних покриттів, що наносяться на поверхню спеціальних підкладок. З антифрикційних матеріалів випускають, зокрема, широкий асортимент підшипників ковзання.

Відмінності в призначенні і функціонуванні зумовлюють потребу у використанні підшипникових виробів з пористою металокераміки з тими чи іншими значеннями пористості. Для експлуатації в екстремальних умовах (високошвидкісний режим з

можливими ударними навантаженнями), що вимагають наявності особливо міцних опор, застосовують вироби з дрібнодисперсних порошків з невисоким ступенем пористості (до 22%). У середне-навантаженому режимі рекомендовано використовувати пористо-підшипникову продукцію з порошків середнього зерна (22-28 %). Для експлуатації в щадному режимі потрібні вироби з порошків великої дисперсії (28-35%). Чим вище показник пластичності і нижче ступінь пористості металопорошку, тим ближче він по набору функціональних властивостей до компактного металу.

В оптимальному температурному діапазоні (150-180 °С), при слабких навантаженнях і прийнятній кількості додаткового змащення (близько 2,5 крапель/хв. на 1 см<sup>2</sup>) підшипники в залізо-графітовому виконанні з пористістю 22-28 % нормально функціонують в наступних режимах:

V (м/сек.)	0,6	1,1	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,5
P (кг/см <sup>2</sup> )	71	66	61	56	55,5	35,5	18,5	8,6

Для підшипників зі ступенем пористості 16-21 % значення допустимих навантажень підвищують в порівнянні з рекомендованими на 22-32 %. При експлуатації підшипників в режимі швидкостей  $V < 1$  м/сек. застосовують консистентне мастило, в високошвидкісному режимі – негусту мінеральну оливу. При високо-температурних умовах (до 280 °С) металокерамічні підшипники на залізо-графітовій пористій основі можуть експлуатуватися в режимі невисоких швидкостей ( $V < 0,11$  м/сек.) з використанням графітової змазки. Застосування самозмашувальних підшипників з пористого залізографіту можливо лише за умови малої навантаженості і невеликих швидкостей. Підшипники ковзання з пористої металокераміки зазвичай являють собою циліндрові втулки і поставляються вже підготовленими до монтажу.

Застосування антифрикційних матеріалів зумовило можливість підвищення надійності і довговічності пар тертя, заміни дорогих підшипників кочення підшипниками ковзання, які мають вельми помірну ціну, а також недешевих традиційних бабітів і бронз – недорогими залізо-графітовими псевдосплавами. Можливість просочування матеріалів основи твердими мастильними наповнювачами дозволило застосовувати пористі підшипники у випадках, коли

застосування рідкого мастила не уявляється можливим, наприклад, в обладнанні для фармацевтичної промисловості, або при експлуатації в режимі високих температур.

**Фрикційні пористі матеріали.** Фрикційні порошкові матеріали (ГОСТ 17359-82) при ступені пористості 10-13 % мають високі показники коефіцієнту тертя, зносо-, тепло-, корозійної стійкості, міцності, припрацьовуваності. Тому їх використовують в складі технічних пристроїв, призначених для передачі або розсіювання кінетичної енергії (гальм, фрикційних муфт, демпферів та ін.). Результативність експлуатації фрикційних матеріалів багато в чому залежить від показників коефіцієнта тертя і зносостійкості. Широкі можливості ПМ дозволяють отримувати сучасні фрикційні матеріали з різними наборами заданих функціональних властивостей.

Як і антифрикційні, фрикційні матеріали також є пористими композитами, хоча в практичному відношенні й виконують прямо протилежну функцію. Вони складаються з металевих і неметалевих компонентів для деталей, що працюють в маслі (75%) і при сухому терті, у вигляді, відповідно, металевої основи (сталевій, чавунній, мідно-нікелевої й т. ін.). При цьому металокомпоненти дозволяють домогтися високих значень теплопровідності та припрацьовуваності, а безметалеві складові ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графіт та ін.) сприяють збільшенню сили тертя і мінімізують можливість заїдання внаслідок схоплювання (рис. 12.8, 12.9).

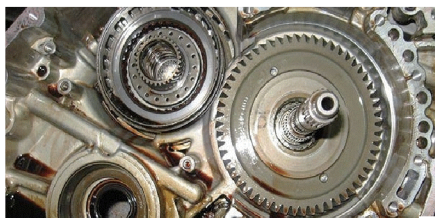


Рис. 12.8. Вироби зі спечених фрикційних металопорошків та припечених до основи під тиском керамічних фрикційних накладок



Рис. 12.9. Керамічні фрикційні накладки (спечена композиція з матеріалів з високим коефіцієнтом тертя, просочених твердою змазкою)

До найбільш затребуваних марок антифрикційних матеріалів належать: ФМК-8; ФМК-11; МКВ-50А; СМК-80; МК-5; МК-263. Перші три марки розроблені для важконавантажених гальм, муфт зчеплення літальних апаратів і дорожньої техніки військового призначення. Марка СМК-80 використовується в складі гальм і муфт зчеплення великовантажної автотехніки (наприклад, кар'єрні самоскиди вантажопідйомністю понад 70 т).

Самими ж поширеними є марки МК-5 і МК-263 на латунно-бронзовій основі, призначені для експлуатації в умовах важких і середніх навантажень при температурі поверхні тертя не більше 550-650 °С. З матеріалів даних марок виготовляють широкий асортимент дисків зчеплення і гальмівних колодок, якими комплектують автотракторну техніку і спецтехніку будівельного та дорожньо-будівельного призначення. Останнім часом для автомашин, тракторів малої та середньої вантажопідйомності все частіше використовуються фрикційні матеріали на полімерній основі.

## 12.6 Електротехнічні порошкові матеріали

Незважаючи на те, що деякі з таких матеріалів можна зарахувати до конструкційних, а деякі – до пористих, по ряду основних експлуатаційних властивостей їх доцільно виділити в окрему категорію.

Електротехнічна порошкова металокераміка здебільшого являє собою псевдосплави складно-композитної структури, отримувати які можна тільки методами порошкової металургії. Вони затребувані при виготовленні електроконтактних груп, постійних магнітів, феритів, інших струмопровідних матеріалів і діелектриків (рис. 12.10).

Група електротехнічних матеріалів поділяється на підгрупи:

- електроконтактних (металеві, металографітові, металооксидні і металокарбідні), з яких виробляють контакти ковзного і розривного типів;



Рис. 12. 10. Електротехнічна продукція з порошкових матеріалів

- магнітом'яких зі сплавів типу *Fe-Ni*, *Fe-Si-Al*, *Fe-Cr-Al* та деяких інших феросплавів;
- магнітотверді зі сплавів типу *Fe-Al* (альні), *Fe-Al-Ni-Co* (альніко), *Fe-Al-Mg-Co* (магніко);
- магнітодіелектриків з карбонільного заліза, пермалою *Fe-Ni* (45-85%), альсіферу (*Fe-Al* (5.5%) - *Si* (9,5)), феритів (*Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>* з включенням *NiO*, *MgO*, *MnO*, *ZnO*).

**Контактні електротехнічні матеріали.** Хімічний склад і сфери застосування електротехнічних композиційно-контактних металокерамічних матеріалів регламентовані ГОСТ 3884-67. У свою чергу, їх поділяють на матеріали для контактів розривного та ковзаючого типу. Розривні контакти застосовуються для багаторазових циклів (до декількох мільйонів) замикання-розмикання електроланцюгів. Їм притаманні високі показники зносостійкості, ерозієстійкості при електродуговому впливі, механічної міцності, електропровідності, вони не обгорають і не схильні до самоприварювання. При цьому значення контактного опору повинні бути мінімальними, а критичні показники сили струму і напруги – максимальними.

Чистих металів, здатних в рівній мірі відповідати перерахованим вимогам, в природі немає, тому розривні контакти виготовляють тільки за допомогою порошкової металургії, застосовуючи, зокрема, способи: формопресування і спікання готових виробів з металопорошку або міксів необхідного хімічного складу; штампування з металокерамопрокату, пресування заготовок пористих тугоплавких матриць із подальшим їх просоченням металами, які мають меншу температуру плавлення.

Для отримання набору необхідних функціональних характеристик і в цілях економії дефіцитних кольорових металів металокерамоконтакти часто виконують багатошаровими, причому кожен шар представлений матеріалом певного хімічного складу. Багатошарові розривні контакти отримують шляхом спікання заготовок, спресованих з порошків різного складу, завантажених в прес-форму у вигляді послідовно засипаних шарів. Контактними розривного типу комплектують як слабкострумову, так і високовольтну апаратуру (в цьому випадку застосовуються розривні

контакти зі спеченою вольфрамовою матрицею, просоченою більш легкоплавкими *Cu* або *Ag*).

Ковзаючі контакти (електрощітки) виготовляють зі сплавів на базі порошків *Cu*, *Ag*, *Ni*, *Fe* з додаванням графіту, нітриду бору, а також сульфідів (з метою мінімізації сили тертя); вони застосовуються при виготовленні електродвигунів, електрогенераторів, потенціометрів, струмознімної та іншої електротехнічної апаратури.

Контакти змінного типу використовуються для підведення чи відведення струму на колекторах різних електроустановок, включаючи: тягові двигуни постійного струму зі зниженою напругою, зарядні генератори зі зниженою напругою, асинхронні двигуни будь-яких потужних груп з підйомними щітками, призначені для експлуатації в режимі високої окружної швидкості і щільності струму; асинхронні двигуни будь-яких потужних груп зі щітками постійного притискання. Крім того, ковзаючими контактами також комплектують: контактні кільця до одноякірних перетворювачів, що експлуатуються в режимі високих окружних швидкостей, високої і середньої щільності струму; кільця збудження синхронних та електродвигунів (електрогенераторів) будь-яких потужних груп і напруг, що експлуатуються в режимі середніх окружних швидкостей.

Металокерамічні контактні електрощітки виготовляють із застосуванням методів ПМ з міксу порошків *Cu*, *Ag* та ін. металів. Застосовуються також порошкові вуглеграфітні матеріали, часто з присадками *Pb*, *Sn* та інших пом'якшуючих добавок, з тим, щоб знизити ступінь жорсткості матеріалу і одночасно підвищити його вібростійкість і стійкість до розпорошення. Включення графіту мінімізують можливість налипання і взаємозварювання металевих частинок, знижують ступінь окислюваності, допомагають знизити коефіцієнти зносу й тертя. Найбільш затребуваними є контакти ковзаючого типу з мідно-графітних і бронзово-графітних композиційних матеріалів.

***Магнітні електротехнічні матеріали.*** Із застосуванням методів ПМ здійснюють отримання електротехнічних матеріалів, з яких виробляють постійні магніти. Завдяки наявності постійних магнітних властивостей, а також тому, що основою кожного з них є залізо, ці матеріали називають також феромагнітними.



Вихідними матеріалами для виготовлення металокерамічних магнітів є сплави на базі заліза з добавками легуючих присадок у вигляді сполук *Ni*, *Co*, *Al* і ряду інших металів. Мікс порошків піддають формопресуванню, потім – спіканню, а на закінчення спечені заготовки гартують-відпускають або проводять їх намагнічування іншими способами термічного впливу. Ступінь пористості таких матеріалів повинна бути мінімальною, тому що по мірі зростання пористості знижуються магнітні властивості.

Магніти з феромагнітної металокераміки застосовують в апаратурі зв'язку, медичних приладах, системах запалювання ДВЗ, полюсах електродвигунів постійного струму і т.д. Кінцевою продукцією з магнітних матеріалів є пластини, смуги, втулки, кільця, вироби інших конфігурацій.

Порошкові магніти перевершують аналоги, що виготовляються традиційними способами, по цілому ряду функціональних параметрів, основними з яких є більш точний хімічний склад і підвищена однорідність експлуатаційних характеристик. Спечені магнітні матеріали поділяють на магнітом'які (в т. ч. магнітодіелектрики), що характеризуються високими показниками магнітної проникності і невисокими – коерцитивної сили, а також магнітотверді, що відрізняються навпаки, малими показниками магнітної проникності і високими – коерцитивної сили (рис. 12.11).

В якості вихідних порошкових компонентів магнітом'яких феромагнетиків використовуються чисте залізо, а також порошкові сплави *Fe* з *Ni* і *Co* (пермалої, пермінвар і ін.).



Рис. 12.11. Вироби з феромагнітних матеріалів

Особливу групу складають порошкові *феромагнетики* на основі феритів – спечених в кисневому середовищі магнітних композиційних матеріалів з дрібнодисперсних порошкових сумішей оксидів заліза з оксидами дво- і тривалентних металів – *MnO*, *MgO*, *ZnO*, *NiO* та ін.

Феритові притаманні дуже високі значення питомого опору, які більш ніж в 1000 разів перевищують аналогічний показник для заліза.

Різновидом магнітом'яких матеріалів є магнітодіелектрики. Структурно вони являють собою багатокомпонентні сполуки з шаруватого матеріалу – феромагнетику, що виготовляється на основі альсифера, карбонільного заліза або пермалюїв (залізо-нікелевих сплавів), розділених тонкими проміжками ізолятора-діелектрика (рідкого скла, бакеліту, шеллаку, синтетичних смол). Вміст останніх в магнітодіелектриках знаходиться в межах від 4,5 до 16 %. Існують також магнітодіелектрики, що виготовляються з м'яких феримагнетиків.

Магнітотверді (магнітожорсткі) порошкові матеріали виробляють зі сплавів (типу альні, альніко, магніко, куніко, куніфе та ін.), близьких по хімічному складу до литих. Домогтися високих показників магнітних властивостей дозволяють і магнітотверді композиції з рідкоземельних хімічних елементів та кобальту (типу  $RCo$ , де  $R = Sm, Pr, Ce$ ). Після спікання магнітотвердих сплавів проводять їх термообробку. При виготовленні магнітів з дрібнодисперсних порошоків (із діаметром зерен до 0,6 мкм) їх маса в порівнянні з магнітами литого генезу знижується вдвічі, що важливо для практичних цілей. Застосування порошкових магнітотвердих сплавів замість ливарних дозволяє збільшити вихід кінцевої продукції більш ніж на 80 %.

Феромагнітні матеріали затребувані в різних сферах сучасної електротехніки. Продукція з магнітом'яких матеріалів використовується в трансформаторних пристроях, електродвигунах, електрогенераторах, слабкоточній апаратурі і т.д. З магнітожорстких матеріалів виготовляється велика номенклатура постійних магнітів універсального призначення (зазвичай масою  $\leq 100$  г.), що застосовуються в складі електродвигунів та інших електротехнічних пристроїв, де необхідна наявність постійного магнітного поля. Феримагнетики, поєднуючи в собі феромагнітні і напівпровідникові властивості, набули поширення в радіотехніці і електроніці. Вони, зокрема, знаходять широке застосування в якості феритових матриць височастотної радіоелектронної апаратури (в т. ч. телевізійної) і вимірювальної техніки, компонентів стаціонарних і мобільних комп'ютерних пристроїв і т.п.

**Аморфні магнітні матеріали.** Новий клас порошкових магнітоматеріалів – це так звані аморфні матеріали, які застосовують, зокрема, при виготовленні магнітних екранів, трансформаторних сердечників і електронної апаратури.

Аморфні металеві сплави (АМС) виготовляють шляхом майже миттєвого заморожування розплавів (наприклад, Fe<sub>40</sub>N<sub>40</sub>P<sub>10</sub>B<sub>80</sub>) при обов'язковій умові наявності в них певної концентрації аморфізуючих неметалевих хімічних елементів у вигляді *B, P, Si, C*, або металевих з'єднань. Відповідно, клас АМС умовно поділяють на підкласи «металу-неметалу» і «металу-металу». Найбільш промислово-затребуваними є магнітом'які аморфні сплави першого з цих підкласів на базисі металів-феромагнетиків *Fe, Ni і Co*, в поєднанні з аморфізаторами у вигляді різних композицій неметалічних елементів.

У структурному відношенні АМС нагадують замерзлу рідку субстанцію. Процес твердіння настільки стрімкий, що атоми сплаву як би «завмирають» у положеннях, які вони займають при рідкій консистенції розплаву. Аморфну структуру характеризують відсутність кристалічної анізотропії, міжблокових і межзеренного кордонів, інших структурних недоліків, притаманних полікристалічним сплавам. Завдяки своїй незвичайній структурі АМС виявляють ряд унікальних магніто-, механіко-, електровластивостей, а також підвищену корозійну стійкість. Крім високих значень магнітом'якості (таких, що електромагнітні втрати в АМС виявляються набагато меншими, ніж в кристалосплавах), дані матеріали виявляють надзвичайно високу механічну твердість і механічну міцність на розтяг, нерідко маючи майже нульовий коефіцієнт теплового розширення, а величина їх питомого електроопору втричі-вчетверо перевищує аналогічне значення для заліза та феросплавів.

## 12.7 Порошкові матеріали для ядерної енергетики

У сучасній наукомісткій ядерній енергетиці знаходять застосування порошкові матеріали з набором особливих властивостей (на основі *B, Hf, Cd, Zr, W, Pb, U* і т.д.), які використовують при виготовленні регуляційних стрижнів, сповільнювачів і поглиначів нейтронів, а також тепловиділяючих елементів – ТВЕЛів з

використанням порошків діоксиду, карбіду, нітриду урану і порошків тугоплавких сполук інших трансуранових елементів (рис. 12.12).



Рис. 12.12. Касета ТВЕЛІВ для реактору АЕС

Фізико-хімічні властивості порошкових матеріалів для ядерних енергоустановок (ЯЕУ) – це сукупність експлуатаційних характеристик, що дозволяє здійснювати в єдиному комплексі ефективну і безпечну взаємодію матеріалів з технічним довкіллям ЯЕУ на рівні як теплоносіїв (вода, газу, рідкі метали і розплави їх солей), так і контактуючих компонентів (ядерне паливо та ін.).

До набору таких особливих властивостей відносяться, в першу чергу, здатність даних матеріалів витримувати екстремальні механічні, термічні і радіаційні навантаження з одночасним впливом фізичних факторів. Крім цього, даним матеріалам притаманні висока міцність, термостійкість, теплопровідність, стійкість до корозії і впливу радіації. Вельми значущим чинником є поєднання в таких матеріалах високих значень температури плавлення і теплопровідності – з одного боку, з низькими показниками теплоємності, коефіцієнту термічного розширення і щільності – з іншого.

Важливим у практичному плані є й властивість сумісності, тобто ступеня хімічної взаємодії застосовуваного порошкового матеріалу з конструкційними матеріалами ЯЕУ. Вважається, що матеріали взаємно сумісні, якщо вони не вступають один з одним у

хімічну взаємодію, або вона настільки незначна, що не викликає помітних змін хімічного складу, структурних особливостей і набору функціональних властивостей конструкційних матеріалів. Вирішувати завдання із забезпечення необхідного набору властивостей матеріалів для ЯЕУ та їх кількісних показників слід ґрунтуючись на комплексному підході, беручи до уваги не тільки особливості саме порошкових матеріалів, а й експлуатаційні параметри вузлів конструкції реактора.

Перерахованих вище прикладів цілком достатньо, щоб створити уявлення про широту можливостей практичного застосування порошкових матеріалів в різних технічних сферах. Проте, факт залишається фактом: потреба в таких матеріалах зростає буквально з кожним днем, обумовлюючи постійне вдосконалення вже існуючих і розробку нових.

### **Питання для самоконтролю**

1. Що таке порошкова металургія? Які переваги та недоліки способів отримання виробів порошковою металургією?
2. На які групи за видами застосування поділяються порошкові матеріали?
3. Як позначаються порошкові конструкційні матеріали?
4. На які підгрупи поділяються за ознакою технологічного виконання конструкційні металеві матеріали?
5. Що таке кермети, для чого вони застосовуються?
6. Що являють собою мінералокерамічні конструкційні матеріали та на які групи вони поділяються?
7. Що є вихідним матеріалом металевої матриці та армуючих компонентів композитних матеріалів?
8. Які бувають пористі порошкові матеріали?
9. Які матеріали називають трибо технічними пористими матеріалами та на які групи вони поділяються?
10. Що являє собою електротехнічна порошкова металокераміка, для чого її застосовують?
11. Якими фізико-хімічними властивостями повинні володіти порошкові матеріали для ядерних енергоустановок?

## РОЗДІЛ 13

### ДІЕЛЕКТРИЧНІ ТА НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ. ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

*Діелектричні матеріали* – це матеріали, які мають питомий електричний опір  $10^8$ - $10^{16}$  Ом·м, переважно мають іонний або ковалентний тип зв'язку та не мають вільних носіїв зарядів.

Електричні властивості діелектрика визначають галузь його використання, при цьому приймаються до уваги механічні властивості матеріалу, його хімічна стійкість та деякі інші параметри.

Характерною особливістю діелектрика є здатність поляризуватися в електричному полі. Сутність поляризації полягає в зміщенні зв'язаних електричних зарядів під дією поля. Такі заряди створюють власне внутрішнє електричне поле, яке має напрям, протилежний зовнішньому. Мірою поляризації є діелектрична проникність  $\epsilon$ . Вона оцінюється відношенням ємностей  $C_d/C_0$  конденсатору. Ємність  $C_d$  визначається, коли між пластинами конденсатора знаходиться діелектрик, а ємність  $C_0$  – коли замість діелектрика – вакуум. В твердому діелектрику одночасно проявляються декілька видів поляризації, які в сумі визначають значення  $\epsilon$  та його залежність від температури та частоти поля.

Найбільш важливими видами поляризації є електронна, іонна, дипольно-релаксацийна (рис. 13.1) та мимовільна (спонтанна).

Електронна поляризація (рис. 13.1, а) викликана деформацією електронних оболонок атомів. Електрони зміщуються практично миттєво, час встановлення поляризації дуже малий ( $10^{-15}$  с), тому вона не залежить від частоти.

Іонна поляризація (рис. 13.1, б) виникає при пружному зміщенні іонів на відстані, які не перевищують міжатомні. Негативні іони зміщуються в бік позитивного електроду, а позитивні – в бік негативного. Час встановлення іонної поляризації також мале ( $10^{-13}$  с), та  $\epsilon$  також не залежить від частоти.

Дипольно-релаксацийна поляризація (рис. 13.1, в) проявляється в полярних діелектриках. Повороти диполів суттєво змінюють  $\epsilon$ . У неполярних діелектриків  $\epsilon$  набагато більша 2, у полярних – в декілька разів більша. Повороти диполів при накладанні поля та повертання їх до неупорядкованого стану після його зняття потребує подолання

деякого опору молекулярних сил. Ця поляризація виникає та зникає значно повільніше електронної чи іонної поляризацій. Мимовільна поляризація спостерігається тільки у одного класу діелектриків – сегнетоелектриків.

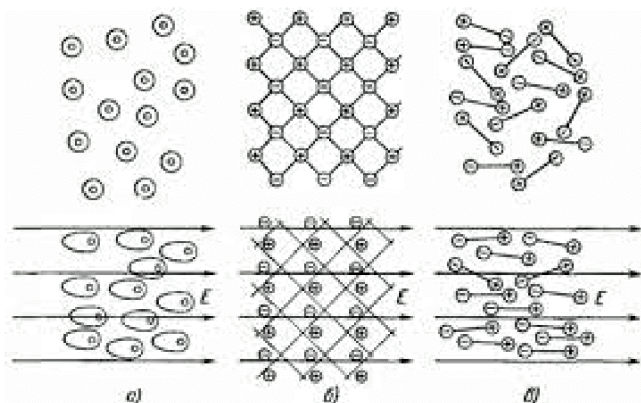


Рис. 13.1. Схеми електронної (а), іонної (б) та дипольно-релаксаційної (в) поляризацій

За хімічним складом діелектрики поділяють на органічні та неорганічні. До перших відносяться полімери (пластмаси), гума, шовк; до других – слюда, кераміка, скло, ситали.

### 13.1 Пластмаси

Пластичними масами (або пластмасами) називають штучно створені матеріали на основі синтетичних або природних полімерів. Їх формують при підвищеній температурі, коли вони мають високу пластичність. Сировиною для отримання полімерів є нафта, природний газ, кам'яне вугілля, сланці.

Поширенню пластмас сприяють їх мала густина, що значно зменшує масу деталей, висока корозійна стійкість. Широкий діапазон властивостей. Добрі антифрикційні характеристики багатьох пластмас дають можливість з успіхом застосовувати їх для виготовлення підшипників ковзання. Високий коефіцієнт тертя деяких пластмас дозволяє використовувати їх для гальмових пристроїв. Певні

пластмаси мають специфічні властивості: високі електроізоляційні характеристики, велику прозорість та ін.

Важливою перевагою пластмас є можливість їх переробки у виробі найбільш продуктивними способами з коефіцієнтом використання матеріалу 0,9 - 0,95 – литтям, видавлюванням тощо. В той же час пластмасам притаманні і деякі недоліки: невисокі міцність, твердість, жорсткість, велика повзучість, особливо у термопластів. Низька теплостійкість. Низька тепло- провідність, здатність старіти (втрачати властивості під впливом теплоти, світла, води та інших факторів). При старінні зменшується еластичність і міцність пластмас, збільшується їх жорсткість і крихкість.

До складу пластмас входять: полімери, наповнювачі, стабілізатори, пластифікатори, отверджувачі та барвники.

*Наповнювачами* (змцнювальними компонентами) можуть бути органічні або неорганічні речовини у вигляді порошків (графіт, деревне або кварцове борошно), волокон (паперових, бавовняних, азбестових, скляних) або листів (тканина, папір, деревний шпон). Наповнювачі підвищують міцність, зносостійкість, теплостійкість та ін. *Пластифікатори* вводять для підвищення пластичності та еластичності пластмас (гліцерин, касторове або парафінове масло).

Добавками можуть бути:

- *стабілізатори* – речовини, які уповільнюють старіння (сажа, сірчані сполуки, феноли);

- *мастильні матеріали* – речовини, що усувають присипання матеріалу до прес-форми, збільшують його текучість, зменшують тертя між частинками композиції (віск, стеарин, олеїнова кислота);

- *барвники* – речовини, що надають пластмасовим виробам декоративного вигляду (охра, сурик та ін.);

- *каталізатори* – речовини, що прискорюють тверднення пластмаси (уротропін, оксиди металів);

- *антипірени* – речовини, які зменшують горючість полімерів (наприклад, сполуки сурми);

- *антистатиками* – речовини, які перешкоджають виникненню і накопиченню статичного електричного заряду у виробках з полімерних матеріалів;

- *пороутворювачі* – речовини, які розпадаються під час нагрівання, виділяючи газу, що спінюють смолу, внаслідок чого утворюється поро- та пінопласти з пористою структурою.



Усі пластмаси за способом вторинної переробки поділяються на термопластичні (термопласти) і термореактивні (реактопласти).

*Термопластичні полімери.* До них відносяться: поліетилен, поліаміди, фторопласти, полістирол, полівінілхлорид та органічне скло (акрилопласт). Їх міцність становить  $100 - 1000 \text{ кг/см}^2$ . До недоліків цих полімерів можна віднести: невисоку теплостійкість, нестабільність властивостей та схильність до повзучості.

*Поліетилен* – неполярний кристалічний полімер, який працює при температурах  $-60+60 \text{ }^\circ\text{C}$  та має високі діелектричні властивості при частотах від  $10^9$  Гц. Застосовується як ізолятор проводів, кабелів, які мають напругу до 10 кВ.

*Поліаміди* – полярний кристалічний полімер, який працює при температурах  $45+150 \text{ }^\circ\text{C}$  (критична температура становить  $180-250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), мають велику міцність, твердість та в'язкість, мають низький коефіцієнт тертя, тобто антифрикційні властивості та зносостійкість. Мають тільки один недолік – поглинання води. Це: капрон, нейлон, перлон, тетарон, неон. Застосовуються як антифрикційні матеріали.

*Фторопласти* – вуглецево-фтористі полімери. Серед них є тверді полімери та каучуки. Найбільш розповсюдженим є фторопласт 4 – неполярний кристалічний полімер з робочою температурою  $-250+250 \text{ }^\circ\text{C}$  не розчиняється в будь якому розчиннику (не поступається золоту і платині), непальний, неігроскопічний, діелектрик; має низький коефіцієнт тертя, невелику твердість. Це гарний антифрикційний матеріал. Одним з представників фторопластів є тефлон.

*Полістирол* – неполярний аморфний полімер з робочою температурою  $-60 +60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Буває технічним або харчовим. Він прозорий та безбарвний. Є гарним високочастотним діелектриком (наприклад, стироекс є основою магнітних стрічок).

*Полівінілхлорид* – полярний аморфний полімер з робочою температурою  $0 + 40 \text{ }^\circ\text{C}$  у чистому виді або з пластифікатором –  $-40+60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Без пластифікатора він називається вініпластом, а з пластифікатором – пластиком. Він непрозорий, дешевий, хімічно стійкий, міцний та зносостійкий; не горить, добре зварюється, має електричну міцність. Це – штучна шкіра, ізоляційна стрічка і т.п.

*Органічне скло (поліакрилат)* – полярний аморфний полімер з робочою температурою  $-180+80 \text{ }^\circ\text{C}$ , безбарвний і прозорий, пропускає ультрафіолетові промені, добре розчиняється в діхлоретані. Має

високі діелектричні властивості, оливо-, бензо-, водостійкий, стійкий проти лугів, солей, але розчиняється у вуглеводнях; набухає в спиртах, малотерmostійкий (+80°C). Скло для літаків, автомашин і вагонів, оптична і годинникова промисловість, світлотехніка, посуд, люстри, труби, ємності, оглядове скло апаратів.

**Термореактивні полімери.** До термореактивних полімерів відносяться: фенолоформальдегідні, епоксидні, поліефірні і кремній-органічні.

*Фенолоформальдегідні* полімери бувають резольні та наволачні. Резольні твердіють тільки при нагріванні, а наволачні – при нагріванні у наявності отверджувача. Температура твердіння становить 160 – 200°C при тиску 130 – 1300 кгс/см<sup>2</sup>. Випускаються у виді прес-порошків (наприклад: фенопласт 03-010-02). Вони стабільні за розмірами, хімічно стійкі. До недоліків відносяться: крихкість, непрозорість, темний колір. Наповнені реактопласти поділяються на прес-порошки і компаунди, волокніти та шаруваті пластики (бавовняна тканина, просочена фенолоформальдегідною смолою називається текстолітом; папір просочений фенолоформальдегідною смолою зветься гетинаксом; азбестова тканина, просочена фенолоформальдегідною смолою – азботекстоліт).

*Епоксидні* полімери бувають рідкі та тверді. Найбільш розповсюдженим є рідкі епоксиди марки ЭД-5. Отверджувачами є аміни та луи. Епоксидні полімери і суміші (компаунди) застосовуються для герметизації електронної апаратури, заливання ізоляції, покриттів на металах, клеїв.

*Поліефірні* полімери – рідкі речовини, що твердіють без тиску при 60 °C; прозорі, добре зчіплюються зі скловолокном, однак, добре горять і мають низьку теплостійкість.

*Кремнійорганічні* полімери (силікони) виробляються у виді розчинів, рідких сумішей і твердих гранул з температурою твердіння 200-250 °C. Застосовуються як лаки, клеї, склопластики і т.д.

## 13.2 Кераміка

Кераміка – це неорганічний матеріал, який одержують з мінералів шляхом формування та високотемпературного (1200 – 2500 °C) спікання. Спікання робиться при відпалюванні кераміки.

Основними операціями в технологічному циклі виготовлення кераміки є:

- подрібнення та перемішування вихідних компонентів в спеціальних млинах. Розмелювання може бути сухе та вологе. Після вологого розмелювання виконують сушіння;
- гранулювання – змішування з пластифікатором (парафіном або розчином полівінілового спирту) та виготовлення гранул;
- формування заготовок (пресування, протягування чи гаряче лиття під тиском);
- спікання – під час нього відбувається видалення вологи та органічних речовин пластифікатора, твердо фазні реакції та усадка виробу.

Часто керамічні матеріали виготовляють за допомогою двократного обпалювання (із додатковим проміжним розмелюванням) для зменшення неконтрольованої усадки виробу.

Кераміка складається з кристалічної, склоподібної та газової фаз. Кристалічна фаза – це певні хімічні сполуки та тверді розчини. Вона є основою кераміки і зумовлює її механічні властивості. Склоподібна фаза розташована в кераміці у вигляді прошарків скла. Вона полегшує технологію виготовлення виробів та зв'язує кристали. Зі збільшенням частки склоподібної фази міцність кераміки знижується, тому її кількість зазвичай обмежують (від 1 до 10 %). Газова фаза міститься в порах кераміки, яка поділяється на щільну (без відкритих пор) і пористу (з відкритими порами). Пористість, навіть закрита, має бути мінімальною. Оскільки вона сильно зменшує міцність кераміки.

Кераміка ізотропна, має гарні електричні властивості, але дуже крихка. У залежності від призначення кераміку поділяють на установочну, конденсаторну, п'єзоелектричну, вакуумну та феромагнітну.

*Установочна* кераміка має гарні ізоляційні властивості та міцність. Основною сировиною є каолін (біла глина), польовий шпат, кварцовий пісок. Вона йде на виготовлення ізоляторів, колодкових плат, котушок і інших виробів, задача яких надати каркасну ізоляцію. Для нормальних частот струму установочна кераміка застосовується у вигляді електрофарфору (30 %  $Al_2O_3$ ), корундо-мулітової кераміки КМ-1 (63 %  $Al_2O_3$ ), ультрофарфору (80 %  $Al_2O_3$ ), алюмінію оксиду (99 %  $Al_2O_3$ ). Для високих частот струму ізолятори виготовляються зі стеатиту (на основі тальку).

*Конденсаторна* кераміка (на основі мінералу тальку, основна кристалічна фаза якого силікат магнезії) призначена для виготовлення конденсаторів високої і низької напруги. Основні матеріали: ультрафарфор, стеатит, стаїнатна кераміка (на основі  $Al_2O_3$ ). Але кращою є кераміка на основі  $Ti_2O$ . Це – тиконіди (Т-60, Т-80, Т-150) та термоконди (Т-20, Т-40) з добавками соди і  $ZnO_2$ . Цифри показують діелектричну проникність. Титаномістка кераміка при тривалій витримці під постійним напруженням схильна до електрохімічного старіння. Прогресивною конденсаторною керамікою є сегнето-кераміка та вариконди.

*П'єзоелектрична кераміка* (або п'єзоелектрики) – це матеріали, в яких під дією механічної енергії виникає поляризація – так званий прямий п'єзоэффект. П'єзоелектрична кераміка являє собою поляризовані матеріали (сегнетоелектрики).

У залежності від хімічного складу промислові п'єзокерамічні матеріали поділяють на типи А, Б, В. До першого типу (тип А) відносяться матеріали на основі титанату барію ( $BaTiO_3$ ) – марки ТБ-1. Відомий ряд твердих розчинів титанату барію-кальцію ( $(Ba, Ca)TiO_3$ ). Одним з оптимальних матеріалів цього типу є матеріал марки ТБК-3, що містить титанат барію, титанат кальцію і карбонат кобальту. Добавки карбонату кобальту зменшують діелектричні втрати в електричних полях великої напруженості, однак знижують температуру фазового переходу ( $T_K$ ) і, як наслідок, мають низькі робочі температури, що обмежує галузь їх застосування. До другого типу п'єзокерамічних матеріалів (типу Б) відносяться тверді розчини титанату-цирконату свинцю (марок ЦТС). Вони одержали широке поширення через високі робочі температури – 180-250 °С. Збільшення концентрації титанату свинцю підвищує робочу температуру до 410 °С (у ЦТС-21), але погіршує п'єзоелектричні властивості. До третього типу (тип В) відносяться тверді розчини ніобату свинцю-барію (НБС-1).

За призначенням п'єзоелектрична кераміка поділяється на чотири класи:

1 клас – матеріали для виготовлення високочутливих випромінювачів та приймачів різних температурних категорій;

2 клас – матеріали для виготовлення п'єзоелементів, які експлуатуються у режимі прийому та випромінювання сильних електричних і магнітних полів;

3 клас – матеріали для виготовлення п'єзоелементів з підвищеною стабільністю частотних характеристик у заданому інтервалі температур;

4 клас – матеріали з високими робочими температурами (понад 250 °C).

Найбільш поширено п'єзокераміку використовують для пристроїв генерації та прийому ультразвуку, датчиків тиску, прискорення та вібрації.

*Вакуумна* кераміка має велику щільність, малі діелектричні втрати, гарні термомеханічні властивості. У вакуумній техніці використовують вироби з корунду, стеатиту та форстериту.

*Феромагнітна* (феритова) кераміка являє собою з'єднання подвійних окислів заліза з двовалентними металами типу  $Me_2O \cdot Fe_2O_3$  або  $MeO \cdot Fe_2O_3$ . Феромагнітна кераміка має високу магнітну проникність, гарні діелектричні властивості. Виготовляються різноманітні сполуки феритової кераміки у залежності від її призначення, які містять  $NiO$ ,  $CaO$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  і інші двовалентні метали. Магнітні властивості виявляються в керамічних виробах лише до визначеної температури (точки Кюрі).

Феритова кераміка застосовується для виготовлення різноманітних виробів: контурних котушок, магнітних екранів, ізоляторів, які застосовуються усередині вакуумних приладів, п'єзоелектричних перетворювачів та конденсаторів низької частоти. Ферити магній-марганцевого складу (з робочою частотою 500 - 20000 МГц) використовують для запам'ятовуючих пристроїв електронно-розрахункових машин. Магнітотверді ферити (барієвий ферит –  $Ba \cdot 6Fe_2O_3$ ) застосовують для виготовлення постійних магнітів.

### 13.3 Скло

*Неорганічне скло* – аморфний матеріал, який одержують сплавленням оксидів або безоксидних сполук. Вихідні порошки розплавляються в скловарних печах, потім вироби формуються (видуванням, витяжкою і т. ін.) з отриманої скломаси та дуже швидко охолоджуються (щоби часточки не встигли утворити кристалічну ґратку). Відпал здійснюють при високій температурі отриманого скла (з наступним повільним охолодженням) для усунення механічних напружень у склі.

За призначенням скло поділяють на *технічне* (оптичне, світлотехнічне, хіміко-лабораторне, для приладів, труб); *будівельне* (віконне, вітринне, армоване, склоблоки); *побутове* (склотара, посуд, побутові дзеркала). Склоутворюючими оксидами є  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $P_2O_5$ . Електричне скло характеризується низькими діелектричними втратами через добавки  $CaO$ ,  $PbO$ ,  $BaO$ .

У залежності від основних склоутворюючих компонентів розрізняють такі види скла: *оксидні* – силікатні ( $SiO_2$ ), алюміно-силікатні ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ), боросилікатні ( $B_2O_3$ ,  $SiO_2$ ), фосфорованадатні ( $P_2O_5$ ,  $V_2O_5$ ), силікотитанатні ( $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ), силікоцирконатні ( $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ); *халькогенідні* – халькогеніди миш'яку, сурми, талію та ін. ( $As_2S_3$ ,  $As_2Se_3$ ,  $As_2Te_3$ ,  $Sb_2Se_3$ ,  $Tl_2Se$ ); *галогенідні* – фторберилатні ( $BeF_2$ ). Халькогенідне скло та скло, яке містить  $V_2O_5$  може бути як діелектриком, так і напівпровідником з електронною або змішаною провідністю.

*Ситали* – це склокристалічні матеріали, отримані за допомогою керованої кристалізації. Ситали займають проміжне положення між звичайним склом і керамікою. Від неорганічного скла вони відрізняються кристалічною будовою, а від керамічних матеріалів – більшими однорідністю й дрібнозернистістю. Найважливішими кристалами – сирцями для одержання ситалів є:  $\beta$ -сподумен ( $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ ), рутил ( $\alpha TiO_2$ ),  $\beta$ -евкрипіт ( $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), кордиєрит ( $2VgO \cdot 2Al_2O_3$ ). Застосовуються в основному у виді емалей для металів.

Серед різноманіття ситалів виділяються фотоситали, у які для кристалізації вводять колоїдні часточки металів (золота, срібла, міді), які виділяються зі з'єднань у складі скла під впливом опромінювання (УФ) після першої стадії термічної обробки, яка полягає в нагріванні до 700-900 °С, при якій відбувається утворення зародків кристалізації. При другій стадії (900-1000 °С) відбувається утворення та зростання кристалів навколо металевих часточок.

У ситалів більш високі електроізоляційні властивості у порівнянні зі склом того ж складу. Ситали високотверді, міцні, термічно й хімічно стійкі. Їх твердість наближається до твердості загартованої сталі (7000-1000 НВ), ударна в'язкість від 4,5 до 10 Дж/см<sup>2</sup>. Застосовуються для плат друкованих схем, сітчастих екранів і запам'ятовуючих електронних трубок. Із ситалів виготовляють також підшипники, деталі двигунів внутрішнього згоряння, труби для

хімічної промисловості. Особлива властивість ситалів (пропускати ультрафіолетові промені) дозволила застосовувати їх для вікон астрофізичних приладів замість кварцового оптичного скла.

*Плівкове та лускате скло.* Це високоякісні конструкційні матеріали, які мають високу механічну міцність (до 1000 МПа), велику пластичність, гарні електричні і термічні властивості. Плівкове скло одержують розтягуванням звичайного листового скла до товщини від 5 до 100 мкм. Лускате скло одержують розламуванням – здрібнюванням найтоншого плівкового скла на невеликі лусочки товщиною 1-5 мкм і менш із подальшим спіканням. Плівкове скло використовують як електроізоляційний папір для високочастотних конденсаторів.

### 13.4 Гумові матеріали

Гумовими матеріалами називають продукти переробки натурального каучуку (НК, високомолекулярної хімічної сполуки вуглецю і водню лінійної структури) або штучного синтетичного каучуку (СК, отриманого зі спирту і нафти) з вулканізатором. Серед конструкційних матеріалів тільки гума відзначається еластичністю, тобто здатністю до великих зворотних деформацій (200-800%) у широкому інтервалі температур. Гумові вироби, крім еластичності, характеризуються достатньо великою міцністю, корозійною стійкістю та зносостійкістю. Вони газо- і водонепроникні, мають добрі електроізоляційні властивості і можуть також, залежно від складу, бути електропровідними.

У результаті переробки вихідних матеріалів між молекулами утворюються поперечні зв'язки, що забезпечують еластичність, міцність і інші властивості. Суміш каучуку з вулканізатором утворюють сиру гуму, а після закінчення вулканізації – гуму. *Вулканізаторами* є сірка, селен, іноді пероксиди, металевий натрій. У м'яких сортах гуми міститься до 3 % сірки від ваги каучуку, а у твердих (ебоніт) – 25-32 % сірки. *Прискорювачами вулканізації* є органічні речовини: каптакс, окис свинцю або свинцевий глет. *Зміцнювачі* – дрібнодисперсні порошки сажі, оксиду кремнію або оксиду цинку – додають для підвищення міцності, твердості та стійкості гумових виробів. Для відповідальних виробів (шини, шланги високого тиску, привідні паси та ін.) використовують волокнисті

зміцнювачі із синтетичних волокон або металевого дроту, покритого латунню, щоб підвищити зчеплення дроту з полімером. *Наповнювачі* – крейда, тальк, барій – які знижують вартість гуми. *Пластифікатори* (парафін, каніфоль, стеаринова кислота, рослинні олії) сприяють рівномірному розподілу компонентів у суміші, полегшують формування виробів та підвищують їх морозостійкість. *Барвенники* (мінеральні й органічні) надають гумовим виробам бажаного кольору. Використовуються в електротехніці як матеріали з гарними діелектричними властивостями.

За призначенням гуми поділяються на гуми *загального* та *спеціального* призначення.

До першої групи належить натуральний каучук (НК) та види синтетичних канчуків, які відрізняються речовинами, які додають при полімеризації: СКБ (синтетичний каучук бутадієновий); СКС (синтетичний каучук бутадієнстирольний) та СКІ (синтетичний каучук ізопреновий).

Гуми *загального* призначення можуть працювати у середовищі води, повітря, неконцентрованих розчинів кислот і лугів. Інтервал робочих температур становить від мінус 35-50 до плюс 80-130 °С. З таких гум виготовляють шини, паси, транспортні стрічки, ізоляцію кабелів, різні гумовотехнічні вироби (вібро- та звукоізолятори, ущільнювачі, протиударні та силові деталі тощо).

Гуми *спеціального* призначення поділяють на маслобензостійкі, теплостійкі, світлоозоностійкі, зносостійкі, електротехнічні, стійкі до гідралічних рідин тощо. Коротко охарактеризуємо властивості спеціальних гум, не зупиняючись на їх складі та конкретних марках.

Маслобензостійкі та стійкі до гідралічних рідин працюють в середовищах палива, мастила, гідралічних рідин. Вони вібростійкі, не втрачають своєї еластичності до мінус 35-60 °С у залежності від марки (наірит, тіокол та ін.). Застосовують для виробництва мастилобензостійких виробів – ущільнюючих прокладок, манжет, рукавів; ущільнень для з'єднань гідросистем, насосів, діафрагм.

Тепло- та морозостійкі гуми працюють у дуже широкому інтервалі температур (від мінус 60 до плюс 250 °С), деякі, наприклад СКТФВ, - від мінус 100 до плюс 350-400 °С.

Світлоозоностійкі гуми виробляють на основі насиченого каучуку (фтор місткі СКФ та етиленпропиленові СКЕП). Вони стійкі



до дії сильних окислювачів, не руйнуються в атмосфері протягом кількох років; застосовуються для ущільнюючих виробів, діафрагм, гнучких шлангів.

Зносостійкі гуми отримують на основі поліуретанових каучуків СКУ, які мають високі міцність, еластичність, опір стиранню, маслбензостійкість. Вони стійкі до кисню і озону, їх газопроникність у 10-20 разів вища за натуральні каучуки, робоча температура складає від мінус 30 до 130 °С. Використовують їх для виготовлення автомобільних шин, транспортних стрічок, жолобів для транспортування абразивних матеріалів, взуття тощо.

Електротехнічні гуми поділяють на електроізоляційні (для ізоляції струмопровідних жил проводів і кабелів, спеціальних рукавичок, взуття) та електропровідні (для екранних кабелів).

Вироби з гуми відіграють взагалі важливу роль в усіх галузях техніки, в медицині та побуті.

### **13.5 Клеї та герметики**

*Клеї* – це розчин природних або штучних високомолекулярних сполук, які застосовують для з'єднання матеріалів. З'єднання відбувається утворенням між поверхнями, що склеюють, та клейовим прошарком міцних адгезій-них зв'язків, обумовлених міжмолекулярною та міжатомною взаємодією. Адгезійні зв'язки посилюються взаємною дифузією атомів матеріалів, що контактують. Для доброго прилягання один з матеріалів – клей – має бути пластичним, а другий – твердим. Клеї – це в'язкі рідини або пасти.

Перевагою клейових з'єднань порівняно з заклепочними та болтовими є більш рівномірне розподілення напружень у з'єднаннях, підвищений опір вібраційним навантаженням, а також відсутність операцій виготовлення отворів під механічні кріплення, зниження ваги виробів, підвищена герметичність з'єднання та ін. Основним недоліком є те, що в більшості клейових з'єднань обмежена теплостійкість (60-400 °С), яка зумовлена органічною природою клеїв.

Основним компонентом клеїв є високомолекулярна сполука з адгезійними властивостями, до якої можуть додаватися розчинники, отверджувачі, каталізатори, пластифікатори, зміцнювачі тощо. Розчинники (спирти, бензин) забезпечують необхідну в'язкість клею, отверджувачі та каталізатори переводять клейовий прошарок з

в'язкого у твердий стан, прискорюючи реакції полімеризації та поліконденсації. Пластифікатори покращують прилягання шару клею до поверхонь, що склеюють. Зміцнювачі – мінеральні порошки, що зміцнюють клейове з'єднання.

В залежності від використання розрізняють клеї конструкційного та не конструкційного призначення. Перші призначені для з'єднань, які працюють в умовах механічних навантажень, а не конструкційні – для ненавантажених з'єднань (таблиця 13.1.).

Клеї поділяють на смоляні та гумові. Смоляні клеї можуть бути термореактивними та термопластичними. В склад термопластичних клеїв входять переважно такі композиції – поліакрилати, поліізобутилен, полівінілхлорид, полівінілацетат та ін. Вони використовуються для несилкових з'єднань металів та неметалевих матеріалів. В склад термореактивних клеїв входять композиції на основі фенолоформальдегідних, епоксидних, поліуретанових, поліефірних, карбамідних, кремнійорганічних та інших смол. Їх використовують для отримання міцних теплостійких клейових з'єднань при виготовленні силових конструкцій з металів та неметалевих матеріалів.

Гумові клеї, в яких основним плівкоутворювачем є каучук, відрізняється високою еластичністю та використовується для склеювання гуми з гумою, гуми з металом чи склом. До складу клеїв гарячої вулканізації додають вулканізуючий агент, склеюють при температурі 140-150 °С, у результаті чого з'єднання за міцністю не поступається основному матеріалу.

Найбільш широке застосування одержали клеї типу БФ і епоксидні. Клеї типу БФ являють собою спиртові розчини фенол-формальдегіднополівінілбутиральних смол, є універсальними і застосовуються для склеювання різних матеріалів (металів, пластмас, кераміки, скла, деревини та ін.). Епоксидні смоли також забезпечують високу міцність з'єднань різних матеріалів при склеюванні – до 65 МПа (650 кг/см<sup>2</sup>) при зрушенні.

При виборі клеїв для конкретних конструкцій необхідно враховувати міцність клейових з'єднань на зсув й їх основні технологічні властивості, водостійкість клейового з'єднання та термостійкість в процесі експлуатації.

Таблиця 13.1. Властивості клейових з'єднань

Марка	Основний полімер	Температура твердіння, °C	Міцність з'єднань при 20 °C		Матеріали, що склеюють
			$\sigma_{\text{відр.}}$ МПа	$\sigma_{\text{відр.}}$ МПа	
Властивості з'єднань з теплостійкістю до 60-80 °C					
88НП	Фенол-каучук	20-60	17	17	Метали, шкіра, тканини, гума, скло, полімери
ПУ-2Б	Поліуретан	20-105	14-18	35	Метали, полімери, оргскло, деревина
ВК32-ЕМ	Епоксидна смола	150	15	50	Метали, склопластики
ЛІ-4	Епоксидна смола	20	6	14	Несилові металеві конструкції
К-153	Епоксидна смола	20-100	10	13	Метали, склопластики, деревина
МПФ-1	Поліамідно-фенольна смола	150-170	20	30	Метали і полімери
Карбоніл	Карбоніл	20-30	12	20	Кераміка, полімери, в несилкових конструкціях
ФЛІ-4С	Епоксидна смола	80-140	10	16	Алюмінієві сплави
Властивості з'єднань з теплостійкістю до 100-150 °C					
ВК-1	Фенол-каучук	100-150	15	75	Сталі, алюмінієві сплави, титанові сплави
ВК-МС	Фенол-каучук	120	21	44	Сталі, алюмінієві сплави, титанові сплави
ВК-9	Фенол-каучук	20	15	20	Сталі, алюмінієві сплави, титанові сплави
Властивості з'єднань з теплостійкістю до 200-350 °C					
ВК-32-200	Фенол-каучук	170-180	17	170	Метали та неметали в силових конструкціях
ВК-7	Епоксидна смола	120-210	10	600	Клейово-зварні з'єднання
ВС-10Т	Фенол-полівініл-ацетатна смола	180	17	60	Метали і неметали
Властивості з'єднань з теплостійкістю до 700-1000 °C					
ВКТ-2	Кремній-органічна смола	250-270	9	22	Метали і неметали

### 13.6 Лакофарбові матеріали

*Класифікація лакофарбових матеріалів.* Лакофарбові покриття є одним із засобів захисту металів і сплавів від корозії і призначені для створення декоративних покриттів на деталях і агрегатах автомобілів. Лакофарбове покриття – це покриття, отримане нанесенням лакофарбового матеріалу на поверхню, що фарбується, з подальшим формуванням плівки. Лакофарбові матеріали – це композиції, здатні забезпечити формування покриттів, що володіють комплексом таких необхідних властивостей, як адгезія, водостійкість, механічна міцність, захист металу, декоративні ефекти. Плівкоутворювачі (або плівкотвірні речовини) лакофарбових матеріалів є полімерами або олігомерами, або їх композиціями, здатними формувати на поверхні плівки в результаті фізичних, хімічних або фізико-хімічних перетворень. Залежно від типу плівкоутворювача, висохла плівка може мати різні властивості.

Розрізняють такі види лакофарбових матеріалів: олійні, емалеві, порошкові фарби, лаки.

*Олійні фарби* – це суспензії, виготовлені розтиранням мінеральних або органічних пігментів в оліях, які служать плівкоутворюючою речовиною. Пігменти надають фарбі відповідного кольору. Рослинні олії варять із добавкою пластифікаторів і сикативів. Отриману олію називають оліфою. Речовини, які застосовують для прискорення процесу твердіння плівок, називають сикативами (солі свинцю, кобальту, марганцю, цинку, кальцію та ін.). Для підвищення тривкості та стійкості шару фарби до складу додають наповнювачі (тальк, каолін).

*Олієвіск* – засіб на основі натуральних олії та воску, який застосовують для фінішного опорядження і водночас захисту дерев'яних поверхонь від вологи і бруду. Віск надає поверхні шовковистості та матовості, підвищує антистатичні та водовідштовхувальні властивості, а також антисептичну дію.

*Емалеві фарби* – це розчини лаків в органічних розчинниках із добавкою пігментів. Подібно лакам емалі дають блискучі плівки і можуть утворювати теплостійкі і корозійностійкі покриття. Емалеві фарби дешевше лаків. Залежно від зв'язуючої речовини розрізняють такі види емалевих фарб: масляні (на масляних лаках), гліфталеві (на гліфталевих лаках) і нітроемалі (на нітроцелюлозних лаках)

Нітроемалі – це матеріали, що швидко висихають та тверднуть вже через кілька хвилин після нанесення на поверхню. Їх недоліки – легка займистість, невисокі теплостійкість і стійкість до дії ультрафіолетових променів.

*Порошкові фарби* – це тверді порошкоподібні композиції на основі епоксидних, поліефірних та інших смол, які використовують для отримання захисних та декоративних покриттів. Переваги порошкових фарб перед іншими видами лакофарбових матеріалів: стабільність властивостей, екологічна безпека, мала трудомісткість при нанесенні. Такі фарби наносять електростатичним напиленням та сушать при 180 – 200 °С протягом 20-30 хв.

*Лаки* – це розчини природних або синтетичних смол у різних розчинниках. За типом розчинників розрізняють спиртові і масляні лаки. Перші являють собою розчин смоли в спирті (КФ-274, МФ-15, ГФ-13, МА-22), другі – в оліфі (БТ-100, БТ-99, БТ-177 та ін.).

Переваги лаків порівняно з фарбами полягають в утворенні блискучіших поверхонь та прискоренні процесу сушіння. Плівки лаків, виготовлених на основі штучних смол, витримують високі температури, вплив лугів і кислот. Недолік багатьох лаків – слабка адгезія до металів, крихкість захисної плівки.

Залежно від складу і призначення лакофарбові матеріали (ЛКМ) поділяють на лаки, емалі, ґрунтовки і шпаклівки. Лаками називають розчини плівкоутворюючих в розчинниках, що не містять пігментів і наповнювачів. Емалями, ґрунтовками і шпаклюваннями є висококонцентровані суспензії пігментів і наповнювачів. Пігментами є забарвлені речовини, нерозчинні в дисперсійних середовищах і здатні утворювати з плівкоутворюючими основами декоративні або декоративно-захисні покриття. Наповнювачі є природними або синтетичними матеріалами, нерозчинними в дисперсійних середовищах, з низькою покривною і фарбувальною здатністю.

Позначення ЛКМ складається з п'яти груп знаків:

1 група – назва матеріалу повним словом (емаль, ґрунт і т. п.);  
2 група – умовне позначення типу плівкоутворювача. Змішані плівкоутворювачі позначаються по основному (що переважає) продукту;

3 група – показує основне призначення матеріалу (атмосферостійкий, консервація, водостійкий, маслобензостійкий);

4 група – означає порядковий (реєстраційний) номер, наданий даному матеріалу, з однієї, двох або трьох цифр;

5 група – показує колір матеріалу (блакитний, синій і т.п.).

Приклад позначення: *Емаль НЦ (нітроцелюлозна)-11 Чорна.*

Для водорозчинних, водоемульсійних, порошкових, пластизольних, органозольних ЛКМ, а також без активних розчинників перед другою групою знаків коду ставиться індекс, що визначає різновид матеріалу: Б – без активного розчинника; В – водорозчинні; ОД – органозольні; ПД – пластизольні; П – порошкові; Е – емульсійні.

Наприклад: *Емаль Б-ЕП(епоксидна)-123 протикорозійна.*

Нанесення лакофарбових матеріалів включає підготовчі операції – фарбування та сушіння. Безпосередньо перед фарбуванням наноситься ґрунтувальний шар (15-20 мкм) для поліпшення зчеплення фарби з металевою поверхнею.

Найпоширеніший спосіб нанесення захисних покриттів – це фарбування розпиленням, яке здійснюється через сопло пістолета з використанням стислого повітря (3-5 атм.). Цей спосіб є продуктивним і використовується для виробів будь-яких габаритів. Після фарбування виріб піддається природному або штучному сушінню.

Рамні конструкції та корпуси різних машин фарбують пентафталевами ПФ-133, алкідно-акриловими АС-182 та фетрифталевами ЗТ-199 емалями. При фарбуванні кабін, крил і лицьових частин машин та агрегатів застосовують нітроемалі НЦ різних марок. Деталі, що зазнають дію високих температур (блоки двигунів, головки, колектори та ін.), покривають лаками з добавками алюмінієвої пудри.

**Властивості лаків і емалей.** Емалі на відміну від лаків, що складаються з розчину плівкоутворювача в летючій рідині, включають пігменти, наповнювачі, пластифікатори та інші спеціальні компоненти, що забезпечують декоративні і механічні властивості покриттів, а також стійкість їх при експлуатації. На відміну від фарб емалі містять розчинники і меншу кількість пігментів і наповнювачів. У зв'язку з цим плівки емалей володіють кращими декоративними властивостями.

Для лакофарбових покриттів, призначених для захисту металів від корозії в атмосферних умовах, важливою характеристикою є проникність. Проникнення вологи через полімерні матеріали протікає по-різному: у одних існують постійні зазори і пори, через які в основному проникають молекули води, в інших же зазори виникають короткочасно в результаті теплового руху макромолекул. Типовим представником першого класу полімерів є фенол-формальдегідні смоли, похідні полістиролу, поліетилену. До другого класу відносяться полімери типу каучуків. Вологопроникність, а також водопоглинання (водонабухання) знаходяться в сильній залежності від структури органічних полімерів. Полімери з тривимірною структурою, наприклад, фенольні смоли, відрізняються сильно розгалуженою структурою, внаслідок чого молекулам водяної пари і води доводиться здійснювати більший шлях. У лінійних полімерах, що відрізняються волокнистою структурою, молекули слабо-розгалужені (наприклад, в нітраті целюлози), тому шлях проникнення молекул набагато коротший, і цей процес проходить без утруднень.

У протикорозійному захисті металевих виробів з кожним роком набувають всього більшого значення інгібітори корозії, що вводяться в лакофарбові матеріали.

*Електроізоляційні лаки, емалі, компаунди.* Електроізоляційні лаки – колоїдні розчини лакової основи, які утворюють після видалення розчинника плівку, яка має електроізоляційні властивості. Лакова основа – смоли, бітуми, спеціальні масла. Розчинники – летючі рідини, які застосовують для розчинення лакових основ, летких в процесі утворення плівки (ароматичні вуглеводні, спирти, складні та прості ефіри, скипидар і т. ін.). Сикативи – речовини, що прискорюють процес висихання масляних лаків (бензин, гас). Пластифікатори – речовини, які надають еластичність і ударну міцність лаковій плівці. Отверджувачі – речовини, що сприяють твердінню плівки лаку. Ініціатори і прискорювачі – речовини, що прискорюють процес утворення полімерів.

Електроізоляційні емалі – це лаки, в складі яких є пігменти (двоокис титану, залізний сурик) – вискодисперсні неорганічні речовини, що підвищують твердість і механічну міцність лакової плівки, теплопровідність.

Просочувальні лаки – масляні, олійно-смоляні, смоляні, для просочення обплетення проводів (целюлозні), лакопаперу, лакотканин, обмоток електричних машин і апаратів (масляні), обмоток трансформаторів (олійно-смоляні).

Покривні лаки – для захисту від вологи (целюлозні, олійно-бітумні, кремнійорганічні).

Клеючі лаки – гліфталеві (на основі гліфталевої смоли), олійно-гліфталеві.

Електроізоляційні компаунди – в основному складаються з тих же речовин, які входять до складу лакової основи електроізоляційних лаків, але, на відміну від лаків, не містять розчинників. У момент застосування при нормальній і підвищеній температурі компаунди перебувають в рідкому стані і тверднуть після охолодження або в результаті хімічних процесів, що відбуваються в них. Крім того, до складу компаундів можуть входити активні розчинники, що знижують в'язкість компаунду, пластифікатори, отверджувачі, ініціатори та інгібітори.

До складу компаунду можуть також входити наповнювачі (пилоподібний кварц, тальк, слюдяний пил, азбестове і скляне волокно) для зменшення усадки, поліпшення теплопровідності, зменшення температурного коефіцієнту розширення і зниження вартості. За хімічним складом електроізоляційні компаунди поділяються на компаунди, що виготовляються на основі нафтових бітумів, рослинних масел і каніфолі, і компаунди на основі синтетичних смол. Компаунди на основі синтетичних смол виготовляються на основі поліефірних, епоксидних, епоксидно-поліефірних, кремнійорганічних та інших смол і композицій.

### 13.7. Деревина

Деревину використовують як конструкційний матеріал у різних галузях промисловості не тільки у натуральному вигляді, а й у вигляді різноманітних композиційних матеріалів на основі деревини. Як матеріал рослинного походження, деревина складається у сухому стані з приблизно 50 % целюлози (природний полімер), біля 25 % високов'язкої рідини (лігніну) та біля 25 % геміцелюлози. Крім перелічених речовин у свіжозрізаних деревині є ще багато води.



При розгляданні макроструктури деревини можна побачити, що вона складається з декількох шарів, починаючи з центру дерева: серцевини, деревини, камбію та кори. Клітини деревини розташовані у вигляді кілець, що утворюються щорічно. Серцевина складається з великих і тонкостінних клітин первинного утворення, є рихлою та неміцною, тому для виготовлення виробів у машинобудуванні серцевинна частина стовбура не використовується. Камбій – тонкий шар живих клітин останнього утворення, розташованих під корою. Кора складається з покривних нашарувань дерева, які охороняють його від впливу різких змін температури, пошкоджень тваринами і комахами, висихання та забезпечує рух живильних речовин. Деревина є по суті результатом багаторічних відкладань камбію, який містить отверділі стінки клітин.

Перевагами деревини, як конструкційного матеріалу, є достатньо високі механічна міцність, опір ударним і вібраційним навантаженням, невелика питома маса та висока питома міцність. Теплофізичні властивості деревини характеризуються малою теплопровідністю та в 20 разів меншим температурним коефіцієнтом лінійного розширення порівняно зі сталлю. Деревина має високу хімічну стійкість до деяких кислот, мастил, солей, газів. Важливими властивостями деревини є її здатність до склеювання, можливість швидкого з'єднання за допомогою цвяхів, шурупів, легкість механічної обробки та гнуття.

Недоліками деревини, що обмежують її застосування, є: гігроскопічність, схильність до ураження грибковими захворюваннями, відсутність вогнестійкості, низький модуль пружності, анізотропія механічних властивостей, неоднорідність будови.

З фізичних властивостей для деревини як конструкційного матеріалу основне значення мають: вологість, зміна розмірів і форми, питома вага. Вологість деревини – кількість води, що знаходиться в ній, %. Усі властивості деревини для порівняння визначають при стандартній вологості 15 %. Виробнича вологість повинна дорівнювати експлуатаційній або бути нижчою на 2 %, інакше деревина всихатиме. Це призведе до зміни розмірів і форми. Питома вага деревини залежить від вологості матеріалу, коефіцієнту об'ємного усихання та дорівнює  $0,34-0,98 \text{ г/см}^3$ . Чим більша питома вага, тим щільніша деревина і тим краще вона чинить опір

навантаженням. М'якими породами є: сосна, липа, ялина, осика, вільха; твердими – дуб, граб, горіх, модрина, груша.

Механічні властивості деревини залежать від вологості та інших факторів. Так, міцність деревини залежить від швидкості навантаження: чим повільніше прикладається навантаження, тим менша величина границі міцності. З часом опір деревини руйнуванню поступово зменшується та досягає визначеної границі довготривалого опору, при якому виріб з деревини може працювати невизначено довгий час. При ударних навантаженнях опір згину в'язких порід в 1,5-3 рази вищий, ніж м'яких.

Матеріали з *натуральної деревини* застосовують у вигляді пиломатеріалів та заготовок. У будівельній галузі більш широко використовують пиломатеріали хвойних порід, оскільки вони менш схильні до загнивання, особливо сосна. Хвойні та тверді листяні породи застосовують для силових навантажених деталей. Дуб і ясен добре піддаються згинанню. М'які породи (липа) є несиловими матеріалами. Хвойні породи використовують у суднобудуванні, автомобілебудуванні, у конструкціях залізничних вагонів, сільськогосподарських машин тощо.

Шпон – широка рівна стружка деревини, яку отримують шляхом луцення або стругання. Товщина листів шпону зазвичай складає 0,55-1,5 мм. Шпон є напівфабрикатом для виготовлення фанери, ДСП (деревних шаруватих пластиків) та гнутих деталей. Шпон з красивою текстурою (бук, дуб) використовують у якості облицювального матеріалу для виробів з деревини.

Фанера – листовий матеріал, який отримують склеюванням шарів шпону. Товщина фанери від 1 до 12 мм. Залежно від вологості та клею, яким склеюють шпон, фанеру випускають наступних марок: ФСФ (на фенолоформальдегідному клеї з підвищеною водостійкістю), ФК (на карбамідному), ФБА (на альбуміноказеїновому клеї) з середньою водостійкістю та ФБ (на білкових клеях) з обмеженою водостійкістю.

Пресовану деревину отримують при гарячому пресуванні брусків, дощок, заготовок, при цьому їх піддають спеціальній термічній обробці в ущільненому стані. Властивості пресованої деревини: питома маса – 1,1-1,42 г/см<sup>3</sup>; межа міцності вздовж волокон при розтягуванні – 1,4-2,3 МПа, при стисканні – 0,9-1,3 МПа, при згинанні – 1,5-2,0 МПа. Пресована деревина є заміником чорних,

кольорових металів і пластмас. У машинобудуванні для виготовлення деталей машин, що працюють при ударних навантаженнях (підшипники, втулки, кулачки, сегменти зубчастих коліс), використовують наступні марки пресованої деревини: ДПО-П, ДПД-П, ДПК-П, ДПГ-Пр. Вкладні з деревини порівняно з бронзовими мають вдвічі менший знос, при цьому знижується витрата мастил.

Деревостружкові плити виготовляють методом гарячого пресування стружки з деревини зі зв'язувальною речовиною. Плити випускають одношарові, тришарові та облицьовані фанерою, папером, шпоном. Деревостружкові плити легкі, мають об'ємну масу 0,35 - 0,45 г/см<sup>3</sup>, мають теплоізоляційні властивості. Для важких та надважких плит питома вага може досягати 0,75-1,1 г/см<sup>3</sup>. Такі плити застосовують для підлоги та бортів вантажних машин і причепів, у будівництві, вагонобудуванні, для виробництва меблів тощо.

Деревоволокнисті плити виготовляють з деревних волокон (роздрібненої деревини), інколи з додаванням зв'язувальних речовин. Під дією високої температури та великого тиску волокна спресовуються в рівномірно міцний матеріал. Плити поділяють на м'які пористі (М-4, М-12, М-20), напівтверді (ПТ-100), тверді (Т-350, Т-400) та надтверді (СТ-500). У позначенні марки плит цифри означають ударну в'язкість (МПа). Деревоволокнисті плити застосовують для оздоблення автобусів, пасажирських вагонів, у будівництві та радіотехнічній промисловості.

### **Питання для самоперевірки**

1. Які матеріали відносяться до діелектриків? Що таке поляризація, які її види?
2. Що таке пластмаси, на які види вони поділяються?
3. Які компоненти входять до складу пластмас, їх призначення?
4. На які види за способом вторинної переробки поділяються пластмаси? Наведіть приклади їх промислового використання.
5. Які матеріали називають керамікою? Які існують види кераміки та де їх використовують?
6. Що являє собою неорганічне скло? На які види воно поділяється за призначенням, де використовується? Що таке ситали?

7. Що називається гумою? Які компоненти додаються до складу гуми та з якою метою?

8. Що таке клеї, які основні компоненти входять до їх складу? На які види поділяються та де використовуються?

9. Для чого використовують лакофарбові покриття, які є види фарб і лаків, де їх використовують? Що таке компаунди?

10. Де використовується деревина? Які існують види деревних матеріалів?

## РОЗДІЛ 14

### ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ ЗА КОРДОНОМ

#### 14.1 Принципи маркування вуглецевих сталей за кордоном

На відміну від країн СНД, де діють єдині державні стандарти на металургійну продукцію, в закордонних країнах існує інше маркування сталей і чавунів.

*Основні принципи класифікації та маркування сталей у Сполучених Штатах Америки.* Технічні суспільства, асоціації та інститути, члени яких розробляють, виготовляють або купують сталеві вироби, видають стандартні специфікації, які мають наступні позначення:

1. Товариство автомобільних інженерів – SAE;
2. Американський інститут заліза та сталі – AISI;
3. Специфікація космічних матеріалів – AMS;
4. Асоціація американських залізниць – AAR;
5. Американське бюро суднобудування – ABS;
6. Американський нафтовий інститут – API;
7. Американська асоціація розробників залізниць – AREA;
8. Американське товариство інженерів - механіків – ASME;
9. Американське товариство з випробувань і матеріалів –

ASTM.

Уніфікована номерна система (UNS) класифікації матеріалів була розроблена Американським товариством з випробувань і матеріалів і товариством автомобільних інженерів. Номер UNS означає хімічний склад матеріалу і призначений для кожного хімічного складу металевого сплаву. Позначення сплаву за системою UNS складається з букви і п'яти цифр. Букви вказують на клас сплавів, а цифри визначають хімічний склад сплавів у межах цього класу.

*SAE - AISI система* розроблена товариством автомобільних інженерів і американським інститутом заліза і сталі та використовується дуже поширено. Вуглецеві сталі містять  $Mn < 1,65 \%$ ,  $Si < 0,60 \%$  і  $Cu < 0,60 \%$ . Вони включені в 1xxx групи в SAE-AISI системі та розділені на чотири серії за властивостями. Приклади хімічних складів і призначення

вуглецевих сталей за класифікацію SAE - AISI та UNS наведені в таблицях 14.1 та 14.2.

Таблиця 14.1. Основні групи вуглецевих сталей за класифікацією SAE-AISI

Позна-чення	Вміст легуючих елементів, %	Примітка
10xx*	Прості ( $Mn < 1,00$ )	* Останні дві цифри вказують на середній вміст вуглецю (у сотих відсотка, %)
11xx	Леговані сіркою 0,1 - 0,2	
12xx	Леговані сіркою та фосфором	
15xx	Прості ( $Mn = 1,00 - 1,65$ )	

Таблиця 14. 2. Хімічний склад та призначення вуглецевих сталей США

Номер UNS	Номер SAE-AISI	Хімічний склад, %				Призначення
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P<sub>max</sub></i>	<i>S<sub>max</sub></i>	
G10100	1010	0,08-0,13	0,3-0,6	0,04	0,05	Деталі машин, механізмів, верстатів і конструкцій низької міцності
G10200	1020	0,18-0,23	0,3-0,6	0,04	0,05	Деталі конструкцій, що працюють при невисоких напругах
G10300	1030	0,28-0,34	0,6-0,9	0,04	0,05	Автомобільні і транспортні пристрої, машинобудування
G10400	1040	0,37-0,44	0,6-0,9	0,04	0,05	
G10500	1050	0,48-0,55	0,6-0,9	0,04	0,05	Вали, осі, шпинделі, штифти, штирі, болти, гвинти, шурупи
G10600	1060	0,55-0,65	0,6-0,9	0,04	0,05	
G10700	1070	0,65-0,75	0,6-0,9	0,04	0,05	Холоднокатана смуга для пружин і ресор високої розмірної точності і низької шорсткості

Сталі можуть вироблятися з добавкою свинцю у кількості від 0,15 до 0,35 %, що позначається буквою L у середині номеру, наприклад 10L45.

Сталі можуть вироблятися з добавкою бору в кількості від 0,0005 до 0,003 %, що позначається буквою В у середині номеру, наприклад 10В46.

Примітка: Вміст кремнію визначається вимогами замовника і може знаходитися у межах менше 0,10 до 0,060 %. Сталі можуть виготовлятися з добавкою свинцю (0,15-0,35%), що позначається літерою L усередині номеру, наприклад: 10L45. Сталі можуть виготовлятися з добавкою бору (0,0005-0,003%), що позначається літерою В усередині номеру, наприклад: 10В46.

**Німецька класифікація (DIN).** Розроблена інститутом Deutsches Institut für Normung. Використовують чисельні або чисельні та буквені ознаки. Приклади сталей наведено в таблиці Д 1.1 додатку 1.

**Японська класифікація (JIS)** розроблена комітетом японських промислових стандартів міністерства міжнародної торгівлі та промисловості. JIS класифікація починається з заголовних букв JIS з наступною буквою, що позначає вид виробу (наприклад, буква G позначає вуглецеві та низьколеговані сталі). JIS позначення даються в таблиці Д 1.1. Наприклад, JIS G3445 STKM11A – низьковуглецева трубна сталь з наступним хімічним складом:  $C = 0,12 \%$ ;  $Si = 0,35 \%$ ;  $Mn = 0,60 \%$ ;  $P = 0,040 \%$ ;  $S = 0,040 \%$ .

**Класифікація сталей та сплавів у Великій Британії (BS)** розроблена британським інститутом стандартів (табл. Д 1.1). Кожне позначення цієї класифікації включає вид виробу та код сплаву. Наприклад, BS 979 708A37 - низьколегована сталь з таким хімічним складом:  $C = 0,35 - 0,40 \%$ ;  $Si = 0,10 - 0,35 \%$ ;  $Mn = 0,70 - 1,00 \%$ ;  $P < 0,040 \%$ ;  $S < 0,050 \%$ ;  $Cr = 0,90 - 1,20 \%$ .

**Класифікація сталей та сплавів, прийнята у Франції (AFNOR)** розроблена Association Française de Normalisation. У марці сталі прописні букви NF, розміщені ліворуч від буквено-цифрового коду. Код складається з заголовної букви з наступним рядом цифр і букв (таблиця Д 1.1, додаток №1). Наприклад, NF A35-562 35MF6 - легована сіркою сталь (легко обробляється різанням) з таким складом:  $C = 0,33 - 0,39 \%$ ;  $Si = 0,10 - 0,40 \%$ ;  $Mn = 1,10 - 1,70 \%$ ;  $P < 0,040 \%$ ;  $S < 0,09 - 0,13 \%$ .

**Італійська класифікація (UNI)** розроблена Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Італійським стандартом передбачено такий порядок маркування сталей та сплавів: на початку марки – заголовні букви UNI, за якими слідує цифровий код продукції та алфавітно-цифрова ідентифікація сплаву (табл. Д 1.1). Наприклад, UNI 5598 3CD5 – низьковуглецева сталь для катанки з наступним складом:  $C < 0,06 \%$ ;  $Mn = 0,25 - 0,50 \%$ ;  $P < 0,035 \%$ ;  $S < 0,035 \%$ ;  $N < 0,007 \%$ .

**Шведська класифікація (SS14)** розроблена шведським інститутом стандартів. Позначення починаються з букв SS, за якими слідує чотиризначне число (табл. Д 1.1).

Відповідність ознак вітчизняних (ДСТ, ГОСТ) та іноземних сталей показані також в таблиці Д 1.1.

## 14.2 Маркування, хімічний склад та застосування іноземних чавунів

**Сірі чавуни.** Відповідно до класифікації **ASTM** (США) сірі чавуни позначають цифрами 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, які вказують на мінімальну межу міцності на розтяг у «ksi» ( $1 \text{ ksi} = 1000 \text{ фунт-сила/дюйм}^2 = 6,8948 \text{ МПа}$ ).

Класифікація сірих чавунів за **SAE** (США) складається з літери "G" та цифри, розподіл якої на 100 дає мінімальну межу міцності на розтяг у «ksi», а за **UNS** (США) - з літери "F" та цифри. Співвідношення між марками сірого чавуну за класифікацією SAE та UNS, в залежності від форми графіту, наступне: G1800 ↔ F10004, G2500 ↔ F10005, G3000 ↔ F10006, G3500 ↔ F10007, G4000 ↔ F10011. Хімічний склад сірих чавунів змінюється у наступних межах (мас. час., %):  $C = 3,0-3,7$ ;  $Si = 1,8-2,8$ ;  $Mn = 0,5 - 1,0$ ;  $S < 0,15$ ;  $P < 0,25$ .

У залежності від марки сірі чавуни мають наступне застосування:

G1800 – невідповідальні дрібні виливки;

G2500 – гальмові барабани, диски зчеплення;

G3000 – автомобільні та дизельні блоки та головки блоків циліндрів, поршні;

G3500 – дизельні блоки, гальмові барабани для важких умов роботи, диски зчеплення;

G4000 – виливки дизельних двигунів, циліндри, поршні, гільзи, розподільчі вали.



**Ковкі чавуни** за класифікацією **ASTM (США)** позначаються такими п'ятизначними цифрами: 32510, 35018, 40010, 45008, 45006, 50005, 60004, 70003, 80002, 90001. Перші три цифри, як що їх розподілити на 10, вказують на мінімальну межу текучості в «*ksi*», а дві останні – відносне видовження ( $\delta$ ) у %. Наприклад, позначення 50005 вказує на те, що ковкій чавун має межу текучості не менше 50 *ksi* (345 МПа) та  $\delta > 5\%$ .

Чавуни марок 32510, 35018, 40010, 45008, 45006, 50005, 60004, 70003, 80002, 90001 застосовують для виготовлення деталей, які працюють в умовах ударних навантажень при нормальних і підвищених температурах.

За системою **SAE (США)** ковкий чавун позначають: M3210, M4504, M5003, M5503, M7002, M8501, де перші дві цифри вказують на мінімальну межу текучості в «*ksi*», а дві останні – відносне видовження ( $\delta$ , %). Наприклад, позначення M5503 вказує на те, що ковкій чавун має межу текучості не менше 55 *ksi* (379 МПа) та  $\delta > 3\%$ .

Чавун марки M3210 застосовують для виготовлення низько-навантажених деталей, які добре оброблюються.

M4504 – компресорні розподільчі вали та маточини.

M5003 – деталі редукторів і коробок передач.

M5503 – деталі з покращеною чутливістю до індукційного гартування.

M7002 – важконавантажені деталі, тяги, шатуни, шарніри, хомути.

M8501 – важконавантажені зносостійкі деталі, шестерні.

В *Німеччині*, стандартом **DIN 1692**, ковкі чавуни маркуються наступним чином: GTS 35, GTS 45, GTS 55, GTS 65, GTS 70, де цифри вказують на мінімальну межу міцності на розтяг в  $\text{кГ/мм}^2$ .

*Французький* стандарт **AP-A38811** передбачає наступне маркування: MN 35-10, MN 38-18, MP 50-5, MP 60-3, MP 70-2. Перші дві цифри вказують на мінімальну межу міцності на розтяг в  $\text{кГ/мм}^2$ , а дві останні – відносне видовження в %.

Подібне маркування *Британського* стандарту **BS 6681**, у якому, в залежності від структури основи, наведені наступні марки чавунів:

– феритна основа: В 30-06, В 32-10, В 35-12;

– перлітна основа: Р 45-06, Р 50-05, Р 55-04, Р 60-03, Р 65-02.

**Високоміцні чавуни.** Марки високоміцних чавунів за класифікацією *UNC*, *ASTM* і *SAE* (США) та їх співвідношення наведено в таблицях 14.3 і 14.4.

Таблиця 14.3. Позначення та співвідношення між марками високоміцних чавунів відповідно систем маркування ASTM і UNC

ASTM	60-40-18	65-45-12	80-55-06	80-60-03	100-70-03	120-90-02
UNC	F32800	F33100	F33800	F34100	F34800	F36820

Таблиця 14.4. Позначення та співвідношення між марками високоміцних чавунів відповідно систем маркування SAE

SAE	D4018	D4512	D5506	D7003
UNC	F32800	F33100	F33800	F34800

За класифікацією *ASTM* перших дві пари цифр позначають, відповідно, мінімальну межу міцності та текучості в «ksi», а дві останніх – відносне видовження в %. За класифікацію *SAE*: перші дві цифри вказують на мінімальну межу текучості в «ksi», а дві останні – відносне видовження ( $\delta$ , %).

У залежності від марки високоміцні чавуни застосовують для наступного виробництва: 60-40-18 – деталі, які працюють при постійному тиску при підвищених температурах; 65-45-12 та 80-55-06 – загального призначення; 80-60-03 – валки для сушіння паперу, які працюють при 230 °С; 100-70-03 – найкраще співвідношення між міцністю та зносостійкістю; 120-90-02 – зносостійкі деталі, які працюють при високих навантаженнях; D 4018 – середньонавантажені деталі з гарною пластичністю; D 4512 – середньо-навантажені деталі, які потребують середньої оброблюваності; D 5506 – високонавантажені деталі, які потребують гарної ударної в'язкості; D 7003 – високонавантажені деталі, які потребують дуже хорошої зносостійкості.

В інших, крім США, іноземних країнах маркування високоміцних чавунів наступне.

В Німеччині, за стандартом *DIN 1693*, високоміцні чавуни маркуються наступним чином: чавуни з феритної основою – GGG40; з феритно-перлітною основою – GGG50, GGG60; з перлітною основою

– GGG70, GGG80. Цифри вказують на мінімальну межу міцності на розтяг в  $\text{кГ/мм}^2$ .

Французький стандарт *NF A32-201* передбачає наступне маркування: чавуни з феритною основою маркуються, як FGS 38-15, FGS 42-12; з феритно-перлітною основою – FGS 50-7; з перлітною основою – FGS 60-2, FGS 70-2. Перші дві цифри вказують на мінімальну межу міцності на розтяг в  $\text{кГ/мм}^2$ , а дві останні – відносне видовження в %.

У Британському стандарті *BS 2789*, у залежності від структури основи, наведені наступні марки чавунів: феритна основа – 400/18, 420/12; феритно-перлітна основа – 450/10, 500/7; перлітна основа – 600/3, 700/2, 800/2; мартенситна основа – 900/2.

Цифри в чисельнику вказують на мінімальну межу міцності на розтяг в МПа, в знаменнику - відносне видовження в %.

В Японії високоміцні чавуни маркують за стандартом *JIS G5502* наступним чином: FCD 40, FCD 45, FCD 50, FCD 60, FCD 70, де цифри вказують на мінімальну межу міцності на розтяг в  $\text{кГ/мм}^2$ .

Маркування та хімічний склад легованих чавунів за стандартами США (ASTM), Німеччини (DIN) та Великої Британії (BS) наведені у табл. Д 1.2 додатку 1.

### 14.3 Маркування іноземних легованих сталей та чавунів

*Маркування іноземних легованих сталей* за класифікацією *SAE – AISI* складається з чотиризначного числа, перші дві цифри позначають групи легованих сталей, останні дві цифри – вміст вуглецю (у сотих частках відсотка). Основні групи сталей відповідно до класифікації *SAE – AISI* (США) наведені в таблиці 14.5. Відповідність вітчизняних та іноземних сталей наведено у додатку 1 (табл. Д 1.1).

*Маркування іноземних легованих чавунів.* За стандартом *ASTM* (США) та *BS* (Велика Британія) леговані чавуни поділяються на три класи та типи А, В, С, D, Е, F, G. Маркування легованих чавунів за класифікацією *DIN* (Німеччина) позначається набором цифр та літер. Цифра перед літерами позначає вміст вуглецю, літери позначають назву основних легуючих елементів, цифри після літер показує їх вміст. Наприклад, марка 260CrMoNi20 21 2 показує, що середній склад чавуну наступний: *C* ~ 2,6 %; *Cr* ~ 20 %; *Mo* ~ 21 %; *Ni* ~ 2 %.

Таблиця 14.5. Основні групи сталей за класифікацією *SAE – AISI*

Позначення	Назва основних легуючих елементів	Вміст легуючих елементів, %
13xx	Марганцеві	Mn $\approx$ 1,75
23xx	Нікелеві	Ni $\approx$ 3,50
25xx		Ni $\approx$ 5,00
40xx	Молібденові	Mo = 0,20-0,25
44xx		Mo = 0,40-0,52
50xx	Хромисті	Cr = 0,27-0,65
51xx		Cr = 0,27-0,65
501xx	Хромисті (підшипникові)	C > 1,00; Cr > 0,5
511xx		C > 1,00; Cr > 1,02
521xx		C > 1,00; Cr > 1,45
31xx	Хромонікелеві	Ni $\approx$ 1,25; Cr = 0,65-0,80
32xx		Ni $\approx$ 1,75; Cr $\approx$ 1,07
33xx		Ni $\approx$ 3,50; Cr = 1,50-1,57
34xx		Ni $\approx$ 3,00; Cr $\approx$ 0,77
41xx	Хромомолібденові	Cr = 0,50-0,95; Mo = 0,12-0,30
46xx	Нікельмолібденові	Ni = 0,85-1,82; Mo = 0,20-0,25
48xx		Ni $\approx$ 3,50; Mo $\approx$ 0,25
61xx	Хромованадієві	Cr = 0,60-0,95; V = 0,10-0,15
72xx	Вольфрамохромисті	W $\approx$ 1,75; Cr $\approx$ 0,75
92xx	Кремнісмарганцевисті	Si = 1,4-2; Mn = 0,65-0,85; Cr < 0,65
9xx	Високоміцні низьколеговані	Різні типи SAE
xxBxx	Бористі	B – сталь містить бор
xxLxx	Леговані свинцем	L – сталь містить свинець
43xx	Нікель-хром-молібденові	Ni $\approx$ 1,82; Cr = 0,50-0,80; Mo $\approx$ 0,25
43Vxx		Ni $\approx$ 1,82; Cr = 0,50; Mo = 0,12-0,25; V > 0,03
47xx		Ni $\approx$ 1,05; Cr $\approx$ 0,45; Mo = 0,2-0,35
81xx		Ni $\approx$ 0,30; Cr $\approx$ 0,40; Mo $\approx$ 0,12
86xx		Ni $\approx$ 0,55; Cr $\approx$ 0,50; Mo $\approx$ 0,20
87xx		Ni $\approx$ 0,55; Cr $\approx$ 0,50; Mo $\approx$ 0,25
88xx		Ni $\approx$ 0,55; Cr $\approx$ 0,50; Mo $\approx$ 0,35
93xx		Ni $\approx$ 3,25; Cr $\approx$ 1,20; Mo $\approx$ 0,12
94xx		Ni $\approx$ 0,45; Cr $\approx$ 0,40; Mo $\approx$ 0,12
97xx		Ni $\approx$ 0,55; Cr $\approx$ 0,20; Mo $\approx$ 0,20
98xx		Ni $\approx$ 1,00; Cr $\approx$ 0,80; Mo $\approx$ 0,25

Хімічний склад та галузі застосування легованих іноземних чавунів наведено в таблиці 14.6 та табл. Д.1.1 додатку 1.

**Таблиця 14.6. Хімічний склад і застосування іноземних  
легованих чавунів**

Описання	Вміст елементів, мас. час. %									Лита основа
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	
Зносостійкі чавуни										
Низьковуглецеві	2,2-2,8	0,2-0,6	0,15	0,15	1,0- 1,6	1,5	1,0	0,5	—	ГП
Високо вуглецеві	2,8-3,6	0,3-2,0	0,3	0,15	0,3- 1,0	2,5	3,0	1,0	—	ГП
Ni-Cr	2,5-3,7	1,3	0,3	0,15	0,8	2,7- 5,0	1,1- 4,0	1,0	—	M + A
Ni-високо Cr	2,5-3,6	1,3	0,1	0,15	1,0- 2,2	5-7	7-11	1,0	—	M + A
Cr-Mo	2,5-3,6	0,5-1,5	0,1	0,06	1,0	1,5	11-23	0,5- 3,5	1,2	M + A
Високо Cr	2,3-3,0	0,5-1,5	0,1	0,06	1,0	1,5	23-28	1,5	1,2	M
Корозійностійкі чавуни										
Високо Si	0,4 -1,1	1,5	0,15	0,15	14-17	—	5,0	1,0	0,5	Ф
Високо Cr	1,2-4,0	0,3-1,5	0,15	0,15	0,5- 3,0	5,0	12-35	4,0	3,0	M + A
Ni-Cr сірий	3	0,5-1,5	0,08	0,12	1,0- 2,8	13,5- 36	1,5- 6,0	1,0	7,5	A
Ni-Cr кулястий	3	0,7-4,5	0,08	0,12	1,0- 3,0	18-36	1,0- 5,5	1,0- 5,5	1,0	A
Жаростійкі чавуни										
Середнє Si	1,6-2,5	0,4-0,8	0,30	0,10	4,0- 7,0	—	—	—	—	Ф
Ni-Cr	1,8-3,0	0,4-1,5	0,15	0,15	1,0- 2,8	13,5- 36	1,8- 6,0	1,0	7,5	A
Ni-Cr-Si	1,8-2,6	0,4-1,0	0,10	0,10	5,0- 6,0	13-43	1,8- 5,5	1,0	7,5	A
Високо Al	1,3-2,0	0,4-1,0	0,15	0,15	1,3- 6,0	—	20-25 Al		—	Ф
Жаростійкі кулясті чавуни										
Середнє Si	2,8-3,8	0,2-0,6	0,08	0,12	2,5- 6,0	1,5	—	2,0	—	Ф
Ni-Cr	3,0	0,7-2,4	0,08	0,12	1,8- 5,5	18-36	1,8-3,5	1,0	—	A
Жаростійкі білі чавуни										
Феритні	1-2,5	0,3-1,5	—	—	0,5- 2,5	-	30-35	—	—	Ф
Аустенітні	1-2,0	0,3-1,5	—	—	0,5- 2,5	10-15	15-30	—	—	A

Примітка: ГП – грубий перліт; М – мартенсит; А – аустеніт; Ф – ферит.

## 14.4 Маркування іноземних кольорових металів та сплавів

Марки міді та мідних сплавів, близькі за хімічним складом, які випускаються у відповідності до стандартів, у тому числі європейських та американських, наведені в таблиці 14.7

Таблиця 14.7. Аналоги марок міді та мідних сплавів

ГОСТ	EN		ASTM
	Позначення	Номер	Номер
М06	Cu-OF	CW008A	C10200
М0 и М1Е	Cu-ETP	CW004A	C11000
М1р	Cu-DLP	CW023A	C12000
М1ф	Cu-DHP	CW024A	C12200
ЛІ96	CuZn5	CW500L	C21000
ЛІ90	CuZn10	CW501L	C22000
ЛІ85	CuZn15	CW502L	C23000
ЛІ80	CuZn20	CW503L	C24000
ЛІ70	CuZn30	CW505L	C26000
ЛІ68	CuZn33	CW506L	C26200
ЛІ63	CuZn36	CW507L	C27200
	CuZn37	CW508L	C27200
ЛІС61-3	CuZn36Pb3	CW603N	C36000
–	CuZn37PbO,5	CW604N	C33500
–	CuZn37Pb1	CW605N	C35000
–	CuZn37Pb2	CW606N	C35300
–	CuZn38Pb1	CW607N	C35000
–	CuZn38Pb2	CW608N	C35300
ЛІС59-1 з обмеж. Pb по ТУ	CuZn39Pb0,5	CW610N	C36500
ЛІС59-1	CuZn39Pb1	CW611N	C37000
ЛІС58-2 по ТУ	CuZn39Pb2	CW612N	C37700
ЛІС59-3	CuZn39Pb3	CW614N	C38500
ЛІС59-2	CuZn40Pb2	CW617N	C37800
ЛІАМn77-2-0,05	CuZn20Al2As	CW702R	C68700
МНДЖ5-1	–	–	C70400
МНДЖМnO-1-1	CuNi10Fe1Mn	CW352H	C70600
МНІ9	–	–	C71000
МНІ25	CuNi25	CW350H	C71300
МНДЖМn30-1-1	CuNi30Mn1Fe	CW354H	C71500
МНДЖМn30-2-2	CuNi30Fe2 Mn2	CW353H	C71640
МНІІ15-20	CuNi18Zn20	CW409J	C75400

Хімічний склад складу міді та мідних сплавів в Україні регламентований спеціальними стандартами. З шести марок міді, передбачених стандартом, тільки дві марки М1 і М1р аналогічні маркам ASTM и EN.

Хімічний склад марок у європейських і американських стандартах вказаний в окремих стандартах на продукцію.

У якості прикладу для порівняння хімічного складу латунних стрічок оберемо найбільш застосовувану марку – Л63.

Аналогом хімічного складу латуні Л63 (за ГОСТ 15527) і ЄС є сплави CuZn36 и CuZn37, у США - C27200 (табл. 14.8).

Таблиця 14.8. Порівняння хімічного складу латуней по стандартам різних країн

Елемент		Л63		C27200	CuZn36	CuZn37
		Хімічний склад, масова частка, %				
Мідь	Cu	min	62,0...	62,0...	63,5...	62,0...
		max	65	65	65,5	64
Цинк	Zn	min	ост.	ост.	ост.	ост.
		max				
Залізо	Fe	min	0,2	0,07	0,05	0.1
		max				
Сурма	Sb	min	0,005	–	–	–
		max				
Вісмут	Bi	min	0,002	–	–	–
		max				
Фосфор	P	min	0,01	–	–	–
		max				
Алюміній	Al	min	–	–	0,02	0,05
		max				
Нікель	Ni	min	–	–	0,3	0,3
		max				
Олово	Sn	min	–	–	0.1	0,1
		max				
Всього		min	0,5	–	–	–
		max				
Разом		max	–	–	–	0,1

Вміст домішок в латуні марки Л63 – 0,5 %, в марках CuZn36 и CuZn37 - 0,1 %, одна, сумарний вміст домішок знаходиться на одному рівні, тому що домішки за нікелем 0,3 % та оловом – 0,1 %, уведені в хімічний склад CuZn36, CuZn37.

Приклади маркування сплавів на основі міді (бронз і латуней), а також їх хімічний склад іноземних (Німеччина, Велика Британія, США) наведені в таблиці 14.9.

Таблиця 14.9. Маркування та хімічний склад іноземних мідних сплавів

Маркування	Вміст елементів, мас, част, %								
	<i>Cu</i>	<i>Sn</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Sb</i>
<b>Олов'яні бронзи</b>									
<i>Стандарт DIN1705 (Німеччина)</i>									
G-SnBzl4	85-87	13-15	0,5	1	-	1	0,2	-	0,25
G-SnBzl2	87-89	11-13	0,5	1	-	1	0,2	-	0,25
G-SnBzl0	89-91	9-11	0,5	1	-	1	0,2	-	0,25
Rg10	87-89	9-11	1-3	1,5	-	1	0,3	-	0,35
Rg7	83-85	6-8	3-5	5-7	-	2	0,3	-	0,35
Rg5	84-86	4-6	4-6	4-6	-	2	0,3	-	0,35
<i>Стандарт BS 1400 (Велика Британія)</i>									
Gl-C 88/10/4	решта	9,5-10,5	1,5-2,5	1,5	0,01	1,0	-	-	-
G2-C 88/8/4	решта	7,5-8,5	3,5-4,5	1,5	0,01	1,0	-	-	-
G3-C	решта	6,5-7,5	1,5-3,0	0,1-0,5	0,01	5-6	-	0,2	-
LG2-C85/5/5/5	решта	4-6	4-6	4-6	0,01	2,0	-	-	-
LG3-C 86/7/5/2	решта	6-8	3-5	1-3	0,01	2,0	-	-	-
LG4-C 88/7/3/3	решта	6,5-7,5	1,5-3	2,5-4,0	0,01	2,0	-	-	-
LB1C76/9/0/15	решта	8-10	1	13-17	0,01	2,0	-	-	-
LB5-C75/5/0/20	решта	4-6	1	18-23	0,01	2,0	0,15	-	-
<i>Стандарт ASTM B143 (CIIIA)</i>									
1A (88-10-2)	86-89	9-11	1-3	0,3	-	1,0	0,15	-	-
IB (88-8-4)	86-89	7,5-9,0	3-5	0,3	-	1,0	0,15	-	-
2A	86-90	5,5-6,5	3-5	1-2	-	1,0	0,25	-	-
2B	85-89	7,5-9,0	2,5-5,0	1,0	-	1,0	0,25	-	-
<i>Стандарт ASTM B144(CIIIA)</i>									
3A (88-10-10)	78-82	9-11	≤0,75	8-11	-	≤0,75	0,15	-	0,55
3B (83-7-7-3)	81-85	6,3-7,5	2-4	6-8	-	≤0,5	0,2	-	0,35
3C (85-5-9-1)	83-86	4,5-6,0	≤2	8-10	-	≤0,5	0,2	-	0,3
3D (78-7-15)	75-79	6,3-7,5	≤0,75	13-16	-	≤0,75	0,15	-	0,75
3E (70-5-25)	68,5-73,5	4,5-6,0	≤0,4	22-25	-	≤0,75	0,15	-	0,75



Стандарт ASTM B145 (США)									
4A (85-5-5-5)	84-86	4-6	4-6	4-6	-	≤1	0,3	-	-
4B (83-4-6-7)	82-84	3,3-4,3	5-8	5-7	-	≤1	0,3	-	-
5A (81-3-7-9)	78-82	2,3-3,5	7-10	6-8	-	≤1	0,4	-	-
5B (76-3-6-15)	75-77	2-3	12-17	5,3-6,8	-	≤1	0,4	-	-
Свинцеві та свинцево-олов'яні бронзи									
Стандарт DIN 1716 (Німеччина)									
G-PbBz25	69-77	3	3	22-28	-	2,5	0,7	-	0,5
G-SnPbBz5	84-87	9-11	1	4-6	-	1,5	0,3	-	0,4
G-SnPbBz10	78-82	9-11	1	8-11	-	1,5	0,3	-	0,05
G-SnPbBz20	69-77	4-6	3	18-23	-	2,5	0,3	-	0,05
Алюмінієві бронзи									
Стандарт DIN 1714 (Німеччина)									
G-AlBz9	88-92	0,3	0,5	0,3	8-11	1,0	1,2	0,5	-
G-FeAlBzF50	83-90	0,3	0,5	0,2	9-11	2,5	2-4	1,0	-
G-NiAlBzF50	78-82	0,3	0,5	0,2	8-10	4-7	4-6	-	-
Стандарт ASTM B148 (США)									
9A	≥86	-	-	-	8,5-9,5	2,5	2,5-4,0	-	-
9B	≥86	-	-	-	9-11	-	0,75-1,5	-	-
9C	≥83	-	-	-	10-11,5	≤2,5	3,0-5,0	≤0,5	-
9D	≥78	-	-	-	10-11,5	3-5,5	3,0-5,0	≤3,5	-
Латуні									
Стандарт DIN 1709 (Німеччина)									
G-MS65	63-67	1	-	1-3	0,1	0,5	0,8	0,2	0,1
Стандарт BS 1400 (Велика Британія)									
SCB1-C	70-80	1-3,5	-	2-5	0,01	1	0,75	-	-
HT B3-C	≥55	≤0,2	-	≤0,2	3-6	1,0	1-2,5	≤4	-
Стандарт ASTM B146 (США)									
6A	70-74	0,75-2,0	-	1,5-3,8	-	-	≤0,6	-	-
6B	65-70	≤1,5	-	1,5-3,8	≤0,3	-	≤0,8	-	-
6C	60-65	0,5-1,5	-	0,8-1,7	≤0,3	-	≤0,8	-	-
Стандарт ASTM B147 (США)									
7A	56-62	≤1,5	-	0,5-1,5	≤1,5	-	≤2	≤1,5	-
8A	55-60	≤1,0	-	≤0,4	0,5-1,5	≤0,5	2	≤1,5	-
8B	60-68	≤0,2	-	≤0,2	3-7,5	-	2-4	2,5-5	-
Стандарт ASTM B149 (США)									
10A	53-58	1,5-3,0	-	5-11	-	11-14	≤1,5	≤0,5	-
11B	64-67	4,0-5,5	-	1-2,5	-	24-27	≤1,5	≤1,0	-

### **Маркування іноземних алюмінієвих сплавів**

Маркування ливарного іноземного алюмінію та його сплавів, за класифікацією Американського національного інституту стандартів (ANSI) і Асоціації алюмінію (AA), стандарт № H35.1, складається з чотиризначного числа та крапки після третього знаку (XXX.X). Перша цифра показує наступні групи сплавів: **1(1XX.X)** –  $Al \geq 99,0 \%$ ; **2(2XX.X)** – головний легуючий елемент мідь; **3(3XX.X)** –  $Si + Cu + Mg$ ; **4(4XX.X)** –  $Si$ ; **5(5XX.X)** –  $Mg$ ; **6(6XX.X)** –  $Mg + Si$ ; **7(7XX.X)** –  $Zn$ ; **8(8XX.X)** –  $Sn$ .

Дві наступні цифри в першій групі вказують на мінімальний вміст алюмінію, а в групах 2-8 – на номер сплаву. Цифра після крапки вказує на метод отримання сплаву. 0 (XXX.0) означає виливок 1 (XXX.1) або 2 (XXX.2) – зливков.

Маркування деформованого іноземного алюмінію та його сплавів, за тією ж класифікацією. Складається з чотиризначного числа (XXXX). Перша цифра показує наступні групи сплавів: **1(1XXX)** –  $Al \geq 99,0 \%$ ; **2(2XXX)** – головний легуючий елемент мідь; **3(3XXX)** –  $Mn$ ; **4(4XXX)** –  $Si$ ; **5(5XXX)** –  $Mg$ ; **6(6XXX)** –  $Mg + Si$ ; **7(7XXX)** –  $Zn$ ; **8(8XXX)** – інші елементи. Друга цифра в першій групі вказує на спеціальний контроль домішок, а в групах 2-8 – на номер сплаву. Дві останні цифри в першій групі вказують на мінімальний вміст алюмінію, а в групах 2-8 – на модифікування сплаву (0 – вихідний сплав без модифікування).

Хімічний склад та маркування деяких іноземних алюмінієвих сплавів наведені в таблиці Д 2.1 (додаток 2).

### **Маркування іноземних магнієвих сплавів**

Магній – найбільш легкий з кольорових технічних металів ( $\gamma = 1,75 \text{ г/см}^3$ ) з температурою плавлення  $650^\circ\text{C}$ . Технічно чистий магній має низькі механічні властивості ( $\sigma_b = 180 \text{ МПа}$ , твердість 30 НВ,  $\delta = 5 \%$ ), схильний до samozапалювання, має низьку тепло- та електропровідність. До складу магнієвих сплавів входять алюміній, цинк, марганець, церій.

У США та деяких інших країнах магнієві сплави маркують за системою ASTM у відповідності з хімічним складом та станом поставки. Позначення сплавів починається з двох літер, які представляють два основних легуючих елементи. Літери розташовуються за зменшенням вмісту елементів або при рівній їх

кількості – по абетці. Далі йдуть цифри, які вказують вміст елементів у відсотках. Наступні літери (А, В, С) відображають модифікацію сплаву за вмістом другорядних легуючих елементів або домішок. Чистота сплаву збільшується від С до А, тобто А – найбільш чистий. Символ Х означає, що сплав є новим і доки не стандартизований (так званий «тимчасово не стандартизований сплав»), наприклад AZ81XA.

Нижче приведені позначення в магнієвих сплавах за ASTM: А – алюміній; Z – цинк; М – марганець; К або W – цирконій; Н – торій; Е – рідкоземельні метали; L – літій; Q – сребро.

Наприклад, сплав AZ31В містить номінально 3 % алюмінію, 1 % цинку, має відрізняючі особливості за вмістом марганцю та домішок (заліза, нікелю), на що вказує літера В, тобто сплав середньої чистоти по домішках.

У Британському стандарті (BS) магнієві сплави позначаються символом MAG (MAGNESIUM) та порядковим номером. Для деформівних сплавів позначення ускладнюється введенням додаткової літери, яка вказує вид напівфабрикату, наприклад MAG-E-121 – магнієвий сплав для пресованих (Extruded) напівфабрикатів, MAG-S-151 – магнієвий сплав для листів (Sheets) і плит.

В Японії магнієві литі сплави позначаються символом MC (Magnesium Castings), деформівні магнієві сплави – MP, MB, MS. Перша літера – магній (Magnesium), друга – вид напівфабрикату: Р – плита, лист (Plate), В – пруток (Bar), S – профіль (Shape). Окрім літерного позначення в японській марці присутня цифра номеру сплаву, наприклад MC3, MP5 і т. п.

Магнієві сплави за кордоном, окрім стандартних позначень, часто мають додаткові позначення та торговельні марки різних організацій та фірм. Наприклад, сплав AZ31 (США) в Англії може мати марку MAG-111, AZ31 Електрон А4, у Германії – MgAl3Zn, Магnezал W383 і т. п.

Для характеристики стану поставки виливків та деформованих напівфабрикатів у різних країнах прийняте спеціальне позначення, яке наносять після марки сплаву. Наприклад, МЛ4Т6 – сплав МЛ4 у загартованому та штучно зістареному стані (табл. 14.10).

Приклади маркування та хімічний склад сплавів магнію США наведені в таблиці 14.11.

Таблиця 14.10. Позначення стану поставки магнієвих сплавів

Стан поставки	Позначення			
	Росія ГОСТ	США ASTM	Велико- британія BS	Японія JIS
Лите або гарячедеформоване	-	F	M	F
Відпалене, ре кристалізоване максимальної пластичності	M	0	0	0
Холодне формоване (нагартоване) або частково відпалене	H	H, H1*, H2*	H, H1, H2	H, H1,H2
Частково загартоване та штучно зістарене (гартування в процесі охолодження після лиття або гарячої деформації)	T1	T5	TE(P)	T5
Відпалене після лиття (частково загартоване). Застосовується тільки для виливків	T2	T2	TS	T2
Загартоване та природно зістарене	T4	T4	TB (W)	T4
Загартоване та штучно зістарене	T6	T6	TF(WP)	T6
Загартоване та стабілізоване	T7	T7	T7	T7
Загартоване, нагартоване та штучно зістарене	T8	T8	T8	T8
<p>* H1 – нагартований стан, досягнутий в результаті холодної деформації без наступного відпалу. H2 – нагартований та частково відпалений стан. Цифра, яка йде за позначеннями H1 чи H2, вказує на ступінь нагартівки або на залишкову величину зміцнення деформацією після часткового відпалу. Ця цифра змінюється від 8 (max зміцнення) до 2 (min зміцнення)</p>				

Таблиця 14.11. Маркування та хімічний склад магнієвих сплавів США

Марка	Вміст елементів, мас. час. %					$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	HRB
	Al	Mn	Th	Zn	Zr				
Ливарні сплави									
AZ63A-T6	6,0	0,15	–	3,0	–	275	130	5	73
HK31A-			3,3		0,7	220	105	8	55
HZ32A-T5			3,3	2,1	0,7	185	90	4	57
QH21A-T6			1,0		0,7	275	205	4	–
ZC63A-T6		0,25-0,75		6,0		210	125	4	55-
ZH62A-T5			1,8	5,7	0,7	240	170	4	70
AS41A-F	4,3	0,35				220	150	4	–
AZ91A-F	9,0	0,13		0,7		230	150	3	63
Деформовані сплави									
AZ10A-F	1,2	0,2		0,4		240	145	10	–
AZ80A-T5	8,5			0,5		380	275	7	82
HM31A-F		1,2	3,0			290	230	10	–
M1A-F		1,2				255	180	12	44
ZC71-F		0,5-1,0		6,5		360	340	5	70-
ZK21A-F				2,3	0,45	260	195	4	–
AZ31B-	3,0			1,0		290	220	15	73
HK31A-			3,0		0,6	255	200	9	68

**Маркування іноземних цинкових, свинцевих та олов'яних сплавів.** Цинк – метал з низькою температурою плавлення (419 °C) і високою питомою вагою (7,14 г/см<sup>3</sup>). Має низьку міцність ( $\sigma_e = 150$  МПа) при високій пластичності ( $\delta \sim 50$  %), гексагональну кристалічну ґратку.

Залежно від чистоти, цинк ділиться на марки ЦВ (99,99 % Zn); Ц0 (99,96 % Zn); Ц1 (99,94 % Zn); Ц2 (99,9 % Zn); Ц3 (98,7 % Zn); Ц4 (97,5 % Zn). Домішками в технічному цинку є свинець, залізо, кадмій та деякі інші.

Свинець – метал з температурою плавлення 327 °C, питомою вагою 11,34 г/см<sup>3</sup>, має гранецентровану кристалічну ґратку. Сплави свинцю використовують для виготовлення виливків шрифтів ручного і машинного набору та оболонок телефонних, морських та кабелів

високої напруги, припоїв (найчастіше всього сплави свинцю та олова). Маркування та хімічний склад сплавів на основі цинку, свинцю та олова у Німеччині наведено у таблиці 14.12.

Таблиця 14.12. Маркування та хімічний склад цинкових, свинцевих і олов'яних сплавів Німеччини

Марка	Вміст елементів, мас. час. %						
	Cu	Sn	Pb	Al	Ni	Fe	Sb
Цинкові сплави. <i>Стандарт DIN 1743</i>							
GD-ZnAl4	0,1	0,002	-	3,5-4,3	0,02	0,05	-
GZnAl6Cu1	1,2-1,6	0,002		5,6-6,0	-	0,05	-
Свинцеві сплави. <i>Стандарт DIN 1741</i>							
SgPb97	-	-	96-98	-		-	2-4
SgPb59	3-4	24-26	58-60	-	-	-	12-14
SgPb46	2-3	39-41	45-47	-	-	-	11-13
Олов'яні сплави. <i>Стандарт DIN 1742</i>							
SgSn78	3,5-4,5	77-79	0-1,5	-	-	-	16-18
SgSn70	4,0-5,0	69-71	9,5-11,5	-	-	-	14-16
SgSn60	3,5-4,5	59-61	22-24	-	-	-	12-14
SgSn50	3,5-4,5	49-51	32-34	-	-	-	12-14

### ***Маркування іноземних титанових сплавів***

Титан ( $t_{\text{плав.}} = 1668 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\gamma = 4,5 \text{ г/см}^3$ ) і його сплави не піддаються корозії в атмосфері, кислотах, воді, газах. Технічний титан добре оброблюється тиском, зварюється (в аргоні), але погано оброблюється різанням. Сплави титану широко використовуються в криогенній техніці, авіації, ракетобудуванні для виготовлення корпусів двигунів, балонів для газу, сопел, дисків, лопаток компресорів, деталей кріплення, фюзеляжів.

У хімічній промисловості з титану та його сплавів виготовляють компресори, клапани, вентиля для роботи в агресивних середовищах. У морському та річному суднобудуванні їх використовують для обшивки морських суден, підводних човнів, виготовлення гребних гвинтів.

Хімічний склад та маркування сплавів титану у США наведено в таблиці 14.13.

Таблиця 14.13. Маркування та хімічний склад титанових сплавів США

Марка	UNS	Вміст елементів, мас. час. %									
		Al	Sn	Zr	Mo	Інші	N	C	H	Fe	O
α + β сплав											
Ti-6Al-4V	R56400	6	-	-	-	4V	0,05	0,10	-	0,3	0,2
α-сплави											
Ti-5Al-2,5Sn	R54520	4,0-6,0	2,0-3,0	-	-	-	0,05	0,08	0,02	0,5	0,2
Ti-5Al-2,5Sn-ELI	R54521	4,5-5,75	2,0-3,0	-	-	-	0,035	0,05	0,013	0,25	0,12
β-сплави											
Ti-13V-11Cr-3Al	R58010	2,5-3,5	-	-	-	12,5-4,5 V 10-12Cr	0,05	0,05	0,025	0,35	0,17
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	R58820	2,6-3,4	-	-	7,5-8,5	7,5-8,5 V	0,05	0,05	0,015	1,6-2,4	0,15
Ti-10V-2Fe-3Al	-	2,5-3,5	-	-	-	9,25-1,75V	0,05	0,05	0,015	1,6-2,5	0,13
Ti -15-3	-	2,5-3,5	2,5-3,5	-	-	14-16 V; 2,5-3,5 Cr	0,03	0,03	0,015	0,30	0,13
Ti -17	-	4,5-5,5	1,6-2,4	1,6-2,4	3,5-4,5	3,5-4,5 Cr	0,05	0,05	0,013	0,25	0,08 - 0,13

Маркування інструментальних матеріалів за стандартом ISO 513:2004 наведено в таблиці Д.2.2 (Додаток № 2).

## РОЗДІЛ 15

### ВИБІР І ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ТЕРМІЧНЕ ЗМІЦНЕННЯ

Вибір матеріалу є дуже відповідальним завданням, яке часто зумовлює надійність та довговічність виробу і конструкції в цілому. Наслідком неправильного вибору матеріалу та невірно призначеної обробки є незадовільна якість машин, приладів, обладнання.

Обраний матеріал повинен забезпечувати необхідну конструкційну міцність, мати оптимальні технологічні властивості, а також бути якнайдешевшим, недефіцитним і екологічно чистим.

Існує взаємозв'язок і взаємообумовленість конструкції виробу, матеріалу і технології його виготовлення. Проектування кожної деталі, вузла, машини проходить через три однаково важливі й залежні між собою стадії: конструювання; вибір матеріалу; розробка технології виготовлення.

Щоб гарантувати високу конкурентоспроможність виробу, необхідно дотримуватися головного принципу: *якнайвища функціональна якість за якнайменшою вартості*.

На першому етапі проектування, згідно з вимогами до конструкції, її маси та умовами експлуатації, має бути вибраний *клас матеріалу*, з якого виготовлятимуть виріб. Оскільки одним з головних показників міцності є тимчасовий опір, за цією ознакою найпоширеніші промислові сплави поділяють на три класи (табл. 15.1).

Таблиця 15.1. Класифікація сплавів за міцністю

Клас сплаву	$\sigma_s$ , МПа		
	Сплави на основі заліза	Сплави на основі алюмінію	Сплави на основі титану
Низької міцності	650	200	400
Середньої міцності	650-1300	200-400	400-800
Високої міцності	> 1300	>400	>800

Для розділу 15 використані матеріали [5]



З таблиці видно, що міцність сплавів різних класів може бути однаковою. Тому для вибору того чи іншого класу необхідно враховувати в першу чергу умови експлуатації. Наприклад, як бажаний матеріал для виготовлення корпусу глибоководного батискафа можна розглядати один з титанових сплавів, які поєднують високі значення питомої міцності й корозійної стійкості у морській воді. При тому ж рівні міцності використання сталі в даному разі не забезпечить потрібної довговічності.

Наступним етапом є вибір конкретного матеріалу з цього класу сплавів на підставі сертифікованих властивостей, які гарантує фірма-виробник відповідно до державних стандартів (з врахуванням можливих способів поліпшення властивостей для одержання високої конструкційної міцності).

Умови роботи деталей можуть бути різноманітними: статичні, циклічні, динамічні навантаження, деформації розтяганням, стисканням, згинанням, скручуванням, низькі або високі температури, агресивні хімічні середовища, особливості тертя, наприклад, у вакуумі, тощо. Проаналізувавши діючі фактори, визначають вимоги до властивостей матеріалу і ранжирують їх за ступенем впливу на надійність машини або механізму. У багатьох випадках деталі працюють в режимі одночасної дії декількох факторів. В такому разі вимоги поділяють на *визначальні* і *менш визначальні* (другорядні).

*Визначальними*, тобто такими, що зумовлюють надійність і довговічність, можуть бути різні властивості. Наприклад, при виборі матеріалу для деталі, яка працює при нормальних температурах, показники жароміцності, жаростійкості не мають значення, і навпаки, вони стають головними для виробів, що працюють при високих температурах. Визначальні вимоги мають бути враховані обов'язково, другорядні – по можливості.

При серійному та масовому виробництві деталей слід звертати увагу на технологічність матеріалу та економічні показники.

### **15.1 Загальні принципи вибору матеріалів для деталей машин**

Оптимальний вибір матеріалу деталі здійснюється за такими взаємопов'язаними і взаємозалежними критеріями:

– геометричні параметри;

- матеріаломісткість;
- механічні та технологічні властивості матеріалу;
- надійність та довговічність виробу;
- вартість і доступність матеріалу;
- охорона довкілля;
- утилізація відходів.

## **15.2 Форма, розміри, технологія виготовлення та матеріаломісткість деталей**

Геометричні параметри – фактор, який в першу чергу зумовлює технологію виготовлення виробу, що впливає на вибір конкретного матеріалу. Технологічні властивості металу мають забезпечити найкращу якість продукції при найменших витратах. Матеріал вважається технологічним, якщо він піддається обробці обраним способом без будь-яких обмежень, спеціальних технологічних засобів, при забезпеченні маловідходної технології та можливості механізації й автоматизації процесу виготовлення виробу.

Деталі складної форми часто одержують литтям. В такому разі з класу сплавів, який задовольняє вимогам за міцністю, вибирають такий, що має добрі ливарні властивості (високу рідкотекучість, незначну схильність до ліквіації, усадки, газопоглинання). Наприклад, неможливо виготовити литтям якісний тонкостінний виріб зі сплаву з низькою рідкотекучістю.

Якщо виріб отримують гарячою чи холодною пластичною деформацією, головною технологічною властивістю металу є деформівність. Слід враховувати, що для холодного деформування придатні маловуглецеві сталі, які мають невисокі показники міцності, але високу пластичність. Однак внаслідок наклепу, що виникає під час такої обробки, пластичність різко знижується. Тому при необхідності отримання високого ступеня деформації операцію деформування необхідно чергувати з проміжними рекристалізаційними відпалами.

При використанні зварювання враховується можливість окрихнення металу в зоні термічного впливу і, як наслідок, виникнення тріщин. Тому, обираючи матеріал, слід звернути увагу на зварюваність, яка погіршується з підвищенням кількості вуглецю і легувальних елементів. Зазвичай рекомендується вибирати сталь з вмістом вуглецю не вищим за 0,25 %.

Дуже великі конструкції отримують зварюванням окремих частин, виготовлених куванням або литтям з матеріалів достатньо високої міцності (зварно-ковані, зварно-литі конструкції). Для них особливо важливо забезпечити задовільну зварюваність вибором необхідних технологічних способів для її поліпшення (зварювання з підігрівом, вибір спеціальних електродів, м'яких режимів зварювання, застосування дуже повільного охолодження). Для матеріалів з обмеженою зварюваністю після зварювання слід проводити відпуск для зниження внутрішніх напружень.

Більшість виробів піддають механічній обробці. У такому разі важливе значення має оброблюваність різанням. Цей показник значною мірою залежить від твердості оброблюваного матеріалу. При утрудненій оброблюваності використовують додаткову термічну обробку для зниження твердості. Залежно від розмірів визначають і легуваність сталей з урахуванням прогартовуваності.

Матеріаломісткість деталі зумовлює не лише первинну вартість матеріалу, а й рентабельність подальшої експлуатації виробу. Сьогодні зменшення матеріаломісткості виробів є одним з найважливіших завдань машинобудування. Тому врахування питомої міцності при виборі того чи іншого сплаву є обов'язковим.

### **15.3 Механічні властивості матеріалів, надійність і довговічність виробів**

Основою вибору матеріалів для створення надійної та працездатної техніки є їх механічні властивості, які характеризують здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню під дією різних видів навантажень, середовищ та температур. До них належать характеристики міцності (тимчасовий опір  $\sigma_{\text{в}}$ , границя текучості  $\sigma_{0.2}$ ), границя витривалості  $\sigma_{-1}$ , пластичність (відносне подовження  $\delta$ , відносне звуження  $\psi$ ), твердість, ударна в'язкість, поріг холодноламкості  $t_{\text{кр}}$ .

Розрахунки конструкції на міцність здійснюють за допустимим напруженням  $[\sigma]$ , яке визначають за міцністю при статичному навантаженні або довговічністю при циклічному навантаженні. При статичному навантаженні допустиме напруження дорівнює відношенню граничного для даного матеріалу напруження до коефіцієнта запасу міцності (коефіцієнта безпеки)  $n$ . За граничне

напруження для пластичних матеріалів приймають границю текучості, для крихких – тимчасовий опір:

$$\begin{aligned} [\sigma] &= \sigma_{0,2} / n_{0,2}; \\ [\sigma] &= \sigma_{\sigma} / n_{\sigma}, \end{aligned}$$

де  $n_{0,2}$  – запас міцності по відношенню до умовної границі текучості;

$n_{\sigma}$  – запас міцності по відношенню до тимчасового опору.

Значення  $n$  залежить від багатьох факторів: розкиду характеристик міцності, присутності в матеріалі дефектів, які допускаються за технічними вимогами, розрахункової методики тощо. На практиці значення коефіцієнта запасу міцності ( $KЗМ$ ) вибирають відповідно до ГОСТ 14249-89.

Згідно з практичним досвідом рекомендовані значення  $KЗМ$  для традиційних матеріалів звичайної техніки складають:  $n_{0,2} = 1,5$ ;  $n_{\sigma} = 2,4$ .

Для посудин та апаратів, що працюють під тиском,  $n_{0,2}$  підвищується від 1,5 до 1,65;  $n_{\sigma}$  – від 2,4 до 4.

Для виробів, які експлуатуються при високих температурах, вводять коефіцієнти запасу повзучості  $n_p$  та тривалої міцності  $n_t$ , значення яких лежать в межах 2,0 - 3,5.

Однак розрахунки на міцність за номінальним напруженням з використанням  $KЗМ$  не завжди гарантують необхідний ресурс роботи конструкції. Це пов'язано з тим, що  $KЗМ$  не враховує низки факторів, які призводять до виникнення локальних піків напружень, результатом чого є утворення субмікроскопічних пошкоджень і руйнування виробів при напруженнях, значно нижчих за допустимі.

Для врахування цих факторів необхідно переходити від розрахунків за номінальним напруженням до аналізу локальних напружень, що виникають в окремих зонах виробів, тобто використовувати характеристики тріщиностійкості, які пов'язують допустиме напруження з максимальним розміром дефектів. Такий підхід реалізують для розрахунків важконавантажених відповідальних конструкцій, які повинні мати високу конструкційну міцність, тобто поєднувати великі показники міцності з достатньою пластичністю та в'язкістю металу.

Пластичність та в'язкість не входять в конструкторські розрахунки, однак їх значення для надійності металу і виготовленої з нього конструкції дуже велике. Пластичність характеризує здатність

металу до перерозподілу напружень в зоні їх концентрації (піків). Пластична деформація в цих місцях запобігає утворенню різних локальних перенавантажень. У машинобудуванні пластичність конструкційної сталі вважають задовільною, якщо  $\delta \geq 15 \%$ .

Слід мати на увазі, що для різних матеріалів співвідношення між пластичністю і в'язкістю може сильно відрізнятися. Наприклад, алюміній має низьку в'язкість при високій пластичності (відносному подовженні  $\delta$ ). Сталь же після покращення характеризується порівняно невеликим відносним подовженням при високому рівні ударної в'язкості.

Для отримання необхідної довговічності дуже важливу роль відіграє стабільність властивостей матеріалу під час роботи. Проблема полягає в тому, що під впливом температури, корозійного середовища, деформаційного старіння, зміни напруженого стану властивості матеріалу можуть змінюватися, що погіршує умови роботи окремих деталей. Наприклад, внаслідок перерозподілу напружень такі деталі як циліндри автомобільних двигунів, пари тертя вал - підшипник ковзання набувають овальної форми, що зменшує термін їх експлуатації.

Як відомо, довговічність деталі також залежить від технологічних чинників. Наприклад, збільшення точності обробки шийок колінчастого валу з 10 до 6 мкм підвищує термін роботи вкладнів підшипників ковзання в 3-4 рази.

Для виробів, що працюють у режимі циклічного навантаження, на довговічність великою мірою впливає стан поверхні.

Поширеним критерієм працездатності металевих сплавів та зварних з'єднань, особливо у випадку їх експлуатації при низьких температурах, є ударна в'язкість, визначена на зразках з надрізом. У різних країнах прийнятий різний гарантований рівень ударної в'язкості: у країнах СНД це  $KCU > 25$  Дж/см<sup>2</sup>, в інших країнах –  $KCV > 30$  Дж/см<sup>2</sup>. Температура, при якій гарантується заданий рівень ударної в'язкості, позначається індексом поруч з її показником, наприклад,  $KCV_{-60} = 50$  Дж/см<sup>2</sup>.

Для сталевих виробів з вимогами до значення границі текучості не вище 350 МПа вибирають відповідну марку сталі звичайної якості. При вищому допустимому рівні  $\sigma_{0,2}$ , залежно від необхідних властивостей, розмірів перерізу та складності конфігурації виробу, для вибору марки сталі слід користуватися ДСТУ 7809:2015

та іншими стандартами, зокрема ГОСТ 4543-2016, які регламентують властивості після різних видів термічної обробки.

Для виробів з перерізом більше 30 мм<sup>2</sup> вибір марки сталі здійснюється з урахуванням прогартовуваності. При цьому слід мати на увазі, що для деталей складної форми навіть при невеликому перерізі не слід використовувати вуглецеву сталь, оскільки її необхідно гартувати у воді, а це може призвести до виникнення значних внутрішніх напружень і спричинити неприпустимі деформації або утворення тріщин.

Великі вироби складної форми рекомендується виготовляти з легованих сталей не тільки через їх вищу прогартовуваність, а також тому, що такі сталі повільніше знеміцнюються при відпуску. Це дозволяє підвищити його температуру та істотноше знизити внутрішні напруження при збереженні необхідного рівня міцності.

## **15.4 Економічні аспекти вибору матеріалів**

Вартість матеріалу залежить від доступності його сировини (величини та локалізації рудних родовищ, обсягу розвіданих сировинних запасів), енергетичних та матеріальних затрат на її видобуток і переробку в матеріал. Економісти вважають, що поріг економічної доцільності використання сировини визначається часом половинного вичерпання її запасів. Після цього настає різке зростання цін на дану сировину, що зменшує доцільність її використання. Оцінюється, що до часу половинного вичерпання родовищ Zn, Pb, Hg, Ni, W, Ag залишається від 40 до 70 років, родовищ Al, Fe та більшості сировини для виробництва кераміки, скла – кілька сотень років.

Вміст різних матеріалів у земній корі сильно відрізняється. Масова частка алюмінію складає ~ 9 %, заліза – 4,5 %, магнію – 2,5 %, титану – 0,6 %, марганцю – 0,1 %, міді – 0,01 %, нікелю – 0,008 %. До того ж якщо в залізних рудах вміст Fe дорівнює 30-70 %, то для кольорових металів цей показник знижується до 5 %, а в деяких випадках до тисячних відсотка (наприклад, для Мо до 0,008 %).

Різними є й енергетичні витрати на отримання металів із руд. В більшості випадків для кольорових металів та сплавів на їх основі вони вищі, ніж для сталей і чавунів. Тому леговані сталі дорожчі за вуглецеві.

З урахуванням перелічених факторів легувальні елементи можна розташувати в такий ряд у порядку підвищення вартості та дефіцитності: Mn, Si, Cr, Ti, Ni, Nb, Mo, V, Co, W.

Обрана марка сталі має містити найменшу кількість дорогих та дефіцитних елементів. Тому високолеговані сталі слід використовувати тільки для забезпечення спеціальних властивостей (корозійної стійкості, жаростійкості, жароміцності).

Вартість матеріалу, крім складу та технології виготовлення, також залежить від об'єму поставки. В поняття мінімальної вартості матеріалів входить як їх оптова ціна, так і приплата до оптової ціни. Наприклад, якщо прийняти, що 1 т сталі звичайної якості коштує 100 грн., то при поставці цієї сталі в кількості 20-40 т приплата за 1 т складає 8 грн., а при замовленні всього 1 т сталі приплата складе 30 грн.

Важливе значення має також *доступність* матеріалу, тобто можливість придбати швидко і близько від місця використання якісний, стандартизований і сертифікований матеріал.

При визначенні способу виготовлення виробу маловідходність є одним з важливіших показників економічності та рентабельності. В таблиці 2 наведені дані про коефіцієнт використання матеріалу (*КВМ*) та енерговитрати на 1 кг продукції для різних методів виготовлення виробів.

Таблиця 15.2. Витрати матеріалу та енергоємність при виготовленні виробів різними методами

Метод виготовлення	КВМ, %	Енерговитрати, МДж/кг
Порошкова металургія	95	29
Точне лиття	90	30-38
Холодне штампування	85	41
Гаряче штампування	75-80	46-49
Обробка різанням	40-50	66-82

Як видно з цієї таблиці, найбільш витратною є обробка різанням. Тому технологія виготовлення виробу має бути розроблена таким чином, щоб обсяг цієї обробки був мінімальним.

## 15.5 Заходи з охорони довкілля й утилізації відходів

При виборі матеріалу виробу необхідно дотримуватися вимог безпеки життєдіяльності та охорони довкілля, які зафіксовані законодавчо у вигляді державних стандартів і технічних умов. Мають використовуватися такі матеріали й технологічні процеси, які шкідливо не впливають на довкілля та здоров'я людини. З цієї причини застосування ртуті, берилію, свинцю, радіоактивних елементів потребує спеціального захисту. Слід замінювати ціанування в токсичних розплавах ціанистих солей нітроцементациєю чи іншою хіміко-термічною обробкою. При цьому токсичні реактиви, сполуки, матеріали не можна викидати у ґрунт, каналізацію, атмосферу. Необхідно здійснювати їх безпечне знищення або вторинне використання (утилізацію).

Щодо матеріалів деталей, які відпрацювали свій ресурс, доцільно передбачити їх вторинне використання або самознищення за рахунок біологічного розкладу з мінімальною екологічною шкодою. Схильність матеріалу до біологічного розкладу визначається його взаємодією з довкіллям (дія температури, сонячного світла, мікроорганізмів, природних хімічних реагентів).

Вторинне використання відпрацьованих матеріалів має переваги перед їх знищенням. По-перше, воно зменшує використання природних сировинних ресурсів, які не відновлюються, і запобігає екологічній шкоді, що завдає технологія виробництва матеріалу. По-друге, енергетичні втрати на відновлення вторинних матеріалів і виготовлення з них виробів є суттєво меншими, ніж на їх первинне використання. Наприклад, для добування алюмінію з руд необхідно майже у 30 разів більше енергії, ніж для його вторинної переробки.

Коротко розглянемо можливості вторинного використання різних матеріалів.

*Метали.* Вторинна переробка більшості металів та їх сплавів реалізується двома способами: шляхом відновлення функцій відпрацьованої деталі або їх вторинним використанням. За першим способом конструкція виробу повинна передбачати демонтаж деталей для повторного відновлення. У сучасному виробництві широко застосовують різні методи ремонту колінчастих та розподільних валів, корпусних деталей (коробки передач, переднього та заднього мостів машин), блока та головки блока циліндрів, деталей муфти зчеплення



тощо. Для реставрації фрикційних поверхонь дисків зчеплення, гальмівних барабанів застосовується електродугове напилення.

Другий спосіб передбачає повторне використання сплавів у вигляді лігатур, металобрухту в металургійному виробництві, видобуток окремих дорогих елементів зі сплаву. Цей вид вторинної переробки застосовують для алюмінієвих сплавів, оскільки вторинні сплави значно дешевші, ніж первинні.

*Пластмаси.* Однією з причин значної популярності полімерів як конструкційних матеріалів є їх хімічна й біологічна інертність. Проте, саме ці властивості роблять їх нездатними до біологічного розкладу. тому вони становлять значну частину відходів сучасного виробництва. Деякі полімери горять, не виділяючи токсичних і забруднювальних речовин, тому їх можна знищувати спалюванням.

Термопластичні полімери придатні до вторинної переробки, оскільки їх можна повторно формувати у виробі під час нагрівання. Вторинна пластмаса дешевша за первинну, проте її якість та вигляд погіршуються з кожним циклом переробки. З неї виготовляють невідповідальні деталі: піддони, ручки інструментів тощо.

Вторинна переробка термореактивних полімерів практично неможлива. Вони повторно використовуються як наповнювачі пластмас.

Існують проблеми зі знищенням чи вторинною переробкою гумових матеріалів. Різні наповнювачі та вулканізація ускладнюють їх утилізацію. Найголовнішим джерелом гумових відходів є автомобільні шини. Вторинне використання автомобільних шин можливе після переробки в автомобільні бампери, брызговики, пальці муфт тощо.

*Композиційні матеріали.* Особливості вторинної переробки композиційних матеріалів зумовлені багатокомпонентністю, специфічним взаємним розташуванням компонентів, що ускладнює їх відокремлення.

Як правило, розв'язання будь-яких екологічних проблем, поєднаних з виробництвом матеріалу, впливає на ціну виробу. Вартість екологічно чистого виробу зазвичай вища за вартість продукту, що не відповідає екологічним вимогам.

## **15.6 Класифікація деталей машин за умовами експлуатації та вибір матеріалів**

Виходячи з умов експлуатації (без урахування специфічних особливостей, пов'язаних з температурою, середовищем тощо), всі деталі машин принципово можна поділити на дві великі групи:

- ті, що в процесі роботи зазнають тертя;
- ті, що не працюють в умовах тертя.

Оскільки на сьогодні переважну кількість матеріалів у загальному машинобудуванні складають сталі, ми обмежимося тільки їх розглядом.

### **15.7 Матеріали деталей, що зазнають тертя**

Прикладом деталей цієї групи є шестірні, різні вали, шворні, пальці та ін. Для них вирішальним фактором, який зумовлює довговічність, є висока зносостійкість, що великою мірою залежить від твердості поверхні. Серцевина виробу для забезпечення високої конструкційної міцності вимагає значно меншої твердості, але вищих показників пластичності та в'язкості. Таким чином, у деталях, що працюють в умовах тертя, необхідно забезпечити різні властивості поверхні і серцевини.

Підвищення твердості поверхні може бути досягнуто поверхневим гартуванням або хіміко-термічною обробкою (цементациєю, нітроцементациєю, азотуванням). Вид поверхневої обробки вибирають залежно від призначення деталі, її навантаженості, необхідного рівня твердості поверхні, температури, середовища, в якому працює виріб, а все це в свою чергу зумовлює вибір конкретної марки матеріалу.

Найвищу твердість (1000-1100 HV) забезпечує азотування. В цементованих та нітроцементованих деталях після гартування з низьким відпуском можна отримати твердість поверхні 58-62 HRC. Якщо виріб піддають поверхневому гартуванню, твердість поверхні, як правило, дещо нижча і, що головне, має більший розкид значень (46-56 HRC), хоча при досконалій технології твердість і в цьому разі може бути в межах 56-62 HRC.

При виборі матеріалу поверхнево зміцнюваних деталей дуже важливе значення має загальний рівень навантажень та їх характер, що зумовлює вимоги до властивостей серцевини виробу.

Для деталей, які працюють у важких умовах і підлягають дії ударних та циклічних навантажень, необхідно забезпечити високі показники міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), втомної міцності ( $\sigma_{-1}$ ), пластичності ( $\delta$ ,  $\psi$ ), ударної в'язкості  $KC$ , тріщиностійкості ( $G_{Ic}$ ,  $K_{Ic}$ ,  $KC_p$ ). Такий комплекс властивостей по всьому перерізу деталі може бути досягнутий при наскрізному прогартуванні. В цьому разі марку сталі вибирають з урахуванням критичного діаметра сталі, який має бути не меншим за товщину (діаметр) виробу.

Оскільки критичний діаметр залежить, головним чином, від вмісту легувальних елементів (при охолодженні в однаковому середовищі), то чим більший переріз деталі, тим більш леговану сталь слід вибирати для її виготовлення.

### **15.8 Сталі для виробів, що піддають поверхневому гартуванню**

Вибір товщини зміцненого шару зумовлюється експлуатаційними вимогами до деталі. Якщо деталь працює лише в умовах зношування, товщину загартованого шару зазвичай приймають  $\sim 1,5\text{--}3$  мм. В тому ж разі, коли виріб зазнає високих контактних навантажень чи передбачається можливість його перешліфовування, загартований шар збільшують до 5 мм, а при особливо великих контактних навантаженнях, наприклад, для валків холодного прокатування – до 10–12 мм. Як відзначалося раніше, площа перерізу загартованого шару має не перевищувати 20 % усього перерізу деталі. Для зубчастих коліс глибина загартованого шару має становити 0,2–0,28 від їх модуля.

Конкретну марку сталі і режим обробки виробу перед поверхневим гартуванням вибирають залежно від вимог до властивостей його поверхні та серцевини. Якщо для деталі необхідна тільки висока твердість поверхні (вироби, для яких вирішальне значення має саме зносостійкість), прогартуваність не є вирішальною вимогою. В цьому разі для деталей призначають вуглецеві або низьколеговані сталі (40, 45, 40Г2, 40Х тощо). Перед поверхневим гартуванням ці сталі, як правило, піддають нормалізації. Такого ж типу сталі і таку ж попередню обробку використовують і для об'ємно-поверхневого гартування виробів.

Якщо деталь, крім тертя, піддається дії циклічних та ударних навантажень, то його серцевина повинна мати високий комплекс властивостей, що може бути досягнуто покращенням. Для таких виробів прогартовуваність набуває вирішального значення, і марка сталі вибирається за умови забезпечення наскрізної прогартовуваності. Вироби спочатку проходять об'ємну термічну обробку – гартування з високим відпуском. Після цього ділянки, що працюють в умовах тертя, для отримання високої зносостійкості піддають поверхневому гартуванню з наступним низьким відпуском (самовідпуском).

Дані, які дозволяють вибрати необхідні технологічні параметри індукційного нагрівання для виробів різного перерізу, наведені в табл. 15.3.

Таблиця 15.3. Взаємозв'язок між частотою струму, товщиною загартованого шару і діаметром виробу

Частота струму, Гц	Глибина нагрівання, мм	Мінімальний діаметр виробу, мм
50	15 – 18	100 – 200
1000	3 – 17	22 – 24
2400	2 – 11	14 – 28
4000	1,5 – 9	11 – 22
8000	1 – 6	8 – 16
10000	0,9 – 5,5	7 – 14
70000	0,3 – 2,5	2,7 – 5,4
400000	0,2 – 1,0	1,1 – 1,2

Слід підкреслити, що поверхнєве гартування приводить до виникнення напружень стиску, які позитивно впливають на експлуатаційні властивості, зокрема, на втомну міцність. Але в місцях, де закінчується поверхнєвий загартований шар (наприклад, вихід кінця загартованої зони на шок при гартуванні шийки колінчастого вала), утворюються напруження розтягу, які можуть призвести до виникнення тріщин. Для зменшення негативного впливу цих напружень рекомендується здійснювати поверхнєву пластичну деформацію (ППД) галтелей загартованих шийок обкочуванням роликми. Така обробка сприяє підвищенню границі витривалості.

## 15.9 Сталі для деталей, що цементують та нітроцементують

Як вже відзначалося, сталі, які цементують або нітроцементують, залежно від прогартуваності, а отже, від зміцнюваності серцевини, поділяються на три групи: з незміцнюваною, слабо зміцнюваною та сильно зміцнюваною серцевиною. До першої належать нелеговані сталі (наприклад, 15, 20, 25), до другої – сталі з кількістю легувальних елементів  $\sim 1\%$  (20Г, 20Х, 20ХН та ін.), до третьої – з вмістом легувальних елементів  $2\%$  та більше (18ХГТ, 20ХГР, 25ХГМ, 18Х2Н4ВА та ін.).

З економічних міркувань для малонавантажених деталей вибирають вуглецеві сталі з незміцнюваною серцевиною або низьколеговані сталі ( $\sim 1\%$  легувального елемента) зі слабо зміцнюваною серцевиною (сталі першої або другої груп). При цьому слід мати на увазі, що вибір сталі другої групи дозволяє здійснювати гартування в оливі, внаслідок чого зменшується можливість короблення. Тому на практиці для таких виробів як шестірні, навіть якщо вони незначно навантажені, використовують леговані сталі другої групи.

Сталі третьої групи із сильно зміцнюваною серцевиною (більше  $2\%$  легувальних елементів) використовують тільки для важконавантажених виробів. Нагадаємо, що в цих сталях завдяки малому вмісту вуглецю мартенсит відпуску, який формується в серцевині деталі після наскрізного прогартування і низького відпуску, поєднує високу міцність і достатню пластичність, що й забезпечує опір серцевини крихкому руйнуванню.

Сталі цієї групи, особливо такі як 25ХГТ, 25ХГМ, часто піддають нітроцементациї, яка має деякі переваги перед цементациєю (див. підрозділ 8.3).

## 15.10 Сталі для виробів, що азотують

Особливістю сталей після азотування є збереження високої твердості до температур  $500-550\text{ }^{\circ}\text{C}$  (підрозділ 8.3). До того ж азотування захищає виріб від корозії. Тому цей вид поверхневої обробки використовують для виробів, які працюють при підвищеній температурі, в агресивних середовищах (наприклад, вставки гільз

циліндрів, плунжери, деталі насосів), або для важконавантажених деталей, від яких вимагається висока контактна міцність.

Перед азотуванням виріб піддають покращенню для забезпечення високого комплексу властивостей серцевини. Оскільки структура сорбіту відпуску, одержана після покращення, добре оброблюється різанням, це дозволяє виконати перед азотуванням практично повністю всі операції механічної обробки (після азотування здійснюють лише тонке шліфування на глибину 0,05 - 0,1 мм).

Режим азотування вибирають, враховуючи товщину шару, яку необхідно отримати для забезпечення потрібних властивостей за даних умов експлуатації, та вплив температури азотування на швидкість процесу (рис. 15.1, а) і твердість азотованого шару (рис. 15.1, б).

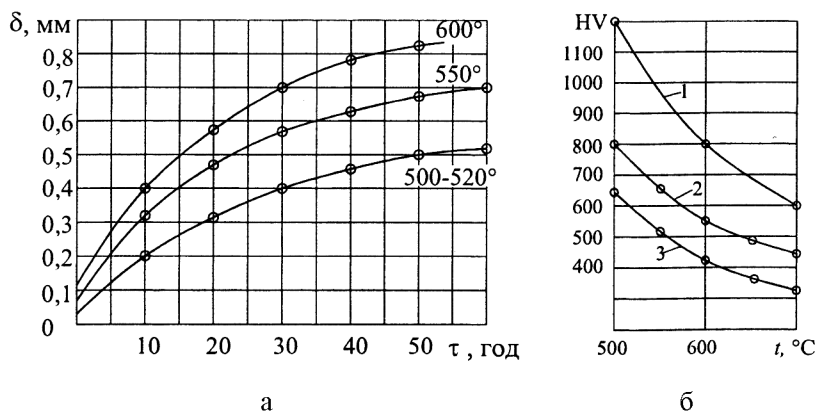


Рис. 15.1. Залежність товщини азотованого шару сталі 38X2MЮА(а) та його твердості (б) від температури азотування для сталей: 1 – 38X2MЮА, 2 – 40X, 3 – 18X2H4BA

Азотування є завершальною операцією. Відсутність гартування після азотування виключає можливість короблення і дозволяє використовувати цей вид ХТО для деталей складної конфігурації з високими вимогами до точності їх форми і розмірів (таблиця Д. 3.1).

Азотування, як і цементація та нітроцементация, супроводжується виникненням напружень стискання, що підвищує втомну міцність.

### 15.11 Матеріали деталей, що не працюють в умовах тертя

Як правило, такі деталі повинні мати однакові властивості поверхні та серцевини. Залежно від умов експлуатації їх можна поділити на пружні елементи та важконавантажені вироби, що працюють під дією високих напружень, в тому числі циклічних, ударних. Вимоги до властивостей матеріалу цих двох груп виробів відрізняються.

Основними вимогами до матеріалів пружних елементів, які працюють при циклічних навантаженнях, зазнаючи великих пружних деформацій, є:

- висока границя текучості ( $\sigma_e/\sigma_{0,2} \rightarrow 1$ ) при певному рівні ударної в'язкості для виключення можливості крихкого руйнування;
- висока границя витривалості  $\sigma_{-1}$ .

До матеріалів другої групи виробів (шатуни, осі, корпусні деталі тощо) вимоги такі:

- високі показники міцності ( $\sigma_b, \sigma_{0,2}$ );
- висока втомна міцність ( $\sigma_{-1}$ );
- високі пластичність ( $\delta, \psi$ ) і ударна в'язкість ( $KC$ );
- високі показники тріщиностійкості ( $G_{Ic}, K_{Ic}, KC_p$ ).

Якщо деталі обох груп працюють при низьких температурах, до цих вимог додається низький поріг холодноламкості  $t_{кр}$  та мінімальне допустиме значення ударної в'язкості. У такому разі сталь слід вибирати за умови, щоб  $t_{кр}$  була нижчою за температуру експлуатації виробу.

### 15.12 Сталі для пружних елементів

Для пружних елементів (ресори, пружини, торсіонні вали, мембрани) використовують вуглецеві та леговані сталі з вмістом вуглецю 0,5-0,7 % (інколи і вище) після гартування і середнього відпуску (див. підрозд. 8.3). Структура сталей після такої обробки - тростит відпуску (феритна основа та дрібні карбідні частинки зернистої форми, кількість яких зумовлюється вмістом вуглецю).

Оскільки від виробів цього типу перш за все вимагається висока границя текучості, більшість ресорно-пружинних сталей легують такими елементами як Mn та Si, які значно зміцнюють ферит. Кількість цих елементів не повинна перевищувати 2 %, щоб запобігти

окрихченню сталей. Таке легування не тільки збільшує прогартовуваність сталей та дозволяє гартувати вироби в оливi для зменшення гартiвних напружень, але й пiдвищує границю текучостi внаслідок змiцнення фериту.

Друга важлива вимога - це висока втомна мiцнiсть. Оскiльки границя витривалостi залежить вiд рiвня мiцностi, можна вважати, що, отримавши термiчною обробкою найвищий можливий рiвень границi текучостi для вибраної сталi, ми досягнемо й необхідного рiвня втомної мiцностi (для сталей з  $\sigma_s < 1300-1400$  МПа).

Додаткове зростання  $\sigma_{-1}$  здiйснюється поверхневою пластичною деформацiєю (ППД), яка створює напруження стиску. Використання ППД зменшує чутливiсть матерiалу до концентраторiв напружень  $\sim$  на 35 %, пiдвищує  $\sigma_{-1} \sim$  на 25 %, показник  $K_{Ic}$  у 1,5 рази, отже, збільшує конструкцiйну мiцнiсть.

### **15.13 Сталі для вiдповiдальних важконавантажених виробiв, що працюють в складно-напруженому станi**

Вироби цiєї групи найчастiше виготовляють з середньо-вуглецевих легованих сталей (0,3-0,5 % С) пiсля покращення. Саме ця обробка, внаслідок якої формується сорбiт вiдпуску (феритно-карбiдна сумiш зернистої будови), забезпечує отримання необхідного комплексу властивостей – високих показникiв мiцностi ( $\sigma_s$ ,  $\sigma_{0.2}$ ), втомної мiцностi ( $\sigma_{-1}$ ), пластичностi ( $\delta$ ,  $\psi$ ), ударної в'язкостi ( $KC$ ), трiщиностiйкостi ( $G_{Ic}$ ,  $K_{Ic}$ ,  $KC_p$ ).

Для досягнення потрiбних властивостей у таких виробах вирiшальне значення має прогартовуванiсть. Розподiл твердостi за перерiзом деталi залежно вiд її дiаметра характеризують U-подiбнi кривi (див. рис. 7.8), якi для сталей рiзних марок можна знайти у вiдповiдних довiдниках.

Змiна тимчасового опору залежно вiд перерiзу деталi пiсля покращення для сталей рiзної легованостi з близьким вiстом вуглецю (0,30-0,34 %), тобто вiд її прогартовуваностi, наведена на рис. 15.2.

З рисунка видно, що при наскрiзній прогартовуваностi у сталях рiзних марок, у тому числi й у вуглецевiй (крива 1), тимчасовий опiр може сягати значення  $\sigma_b > 1200$  МПа. Але через низьку прогартовуванiсть вуглецевої сталi такий високий тимчасовий опiр можна досягти лише в малому перерiзi (менше 10 мм). В



легованих сталях такий рівень  $\sigma_s$  можна отримати в значно більшому перерізі (наприклад, в сталі 30ХНЗМ в перерізі 90 мм).

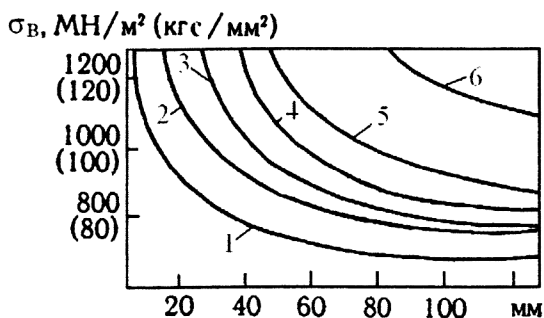


Рис. 15. 2. Залежність тимчасового опору від перерізу сталей марок:

1 - 30; 2 - 30ХНЗА; 35СГ; 3 - 33РЗ; 4 - 33ХСА; 34ХМА;  
5 - 30ХНЗА; 6 - 30ХНЗМ (С.М. Баранов)

Залежно від прогартовуваності покращувані сталі поділяють на п'ять груп. Приклади марок наведені в табл. 9.5.

З економічних міркувань слід вибирати найдешевшу сталь, яка при даному перерізі виробу забезпечує рівень міцності, зумовлений конструкторськими розрахунками.

#### 15.14 Попередня обробка заготовок

Як правило, заготовки після кування, штампування або інших операцій перед механічною і заключною зміцнювальною обробкою піддають попередній термічній обробці – відпалу або нормалізації. Мета такої обробки – поліпшити оброблюваність різанням, отримати рівноважну структуру, максимально зняти внутрішні напруження, що утворилися в процесі виготовлення виробу.

При призначенні попередньої обробки слід враховувати, що нормалізація дешевша і потребує менше часу. Тому в більшості випадків термічна обробка полягає в нормалізації. Якщо після нормалізації оброблюваність різанням утруднена, що може бути пов'язано з формуванням структури з вищою твердістю внаслідок більшої швидкості охолодження порівняно з відпалом, виконують

високий відпуск, який знижує твердість і забезпечує поліпшення оброблюваності різанням.

Відпал слід використовувати для виробів складної конфігурації з легованих сталей, щоб запобігти утворенню структур з підвищеною твердістю і, головним чином, щоб повніше зняти напруження і одержати однорідну структуру. В тому разі, коли напруження зняті недостатньо повно, при наступному гартуванні підвищується ймовірність короблення виробів, особливо якщо вони мають складну форму або велике відношення діаметра до товщини. До таких виробів належать крупні гепоїдні шестірні. Найкращим режимом попередньої термічної обробки цих виробів є ізотермічний відпал, який забезпечує найбільш однорідну структуру по перерізу виробу, оскільки розпад переохолодженого аустеніту здійснюється при постійній температурі (див. підрозд. 8.1).

Узагальнені дані про найпоширеніші марки сталей, їх використання та відносну вартість наведені в таблицях Д 3.1, 15.4, 15.5.

### **15.15 Приклад вибору матеріалу та призначення термічної обробки деталі**

*Завдання.* Вибрати марку сталі та призначити зміцнювальну обробку вала барабана екскаватора з канатно-блочним приводом, який експлуатується в умовах Крайньої Півночі.

*Вихідні дані:*

- границя текучості матеріалу не менше 750 МПа;
- діаметр вала 100 мм;
- твердість на поверхні шийок не менше 55 HRC.

*Порядок виконання завдання*

1. Вибір класу матеріалу. Для вирішення цього питання користуємося табл. 15.1. В ній наведені значення тимчасового опору  $\sigma_s$ , в завданні ж указана границя текучості  $\sigma_{0,2}$ . Відомо, що для більшості конструкційних матеріалів  $\sigma_{0,2}$  складає 0,75-0,90 від  $\sigma_s$  (залежно від конкретного матеріалу та режиму обробки). Тільки для дуже м'яких сталей, які використовуються для холодного штампування, відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_s$  близько до 0,5. Для нашого прикладу ( $\sigma_{0,2} = 750$  МПа) тимчасовий опір має дорівнювати 850-1000 МПа, що за табл. 15.1 відповідає залізовуглецевим сплавам середньої міцності.

Таблиця 15.4. Типові методи зміцнення деталей машин

Метод зміцнення	Характеристики, які досягаються	Типові вироби
Об'ємне гартування, середній відпуск	Отримання високої втомної міцності, високих пружних характеристик. Твердість по всьому перерізу 40-45 HRC	Пружини, ресори, мембрани, торсіони
Об'ємне гартування, високий відпуск	Підвищення (порівняно з нормалізацією) границі витривалості на 30-40 %, довговічності у 2-5 разів, границі контактної витривалості на 20-50 %, значне підвищення ударної в'язкості, пластичності. Твердість по всьому перерізу 25-40 HRC	Вали, вісі, шатуни, деталі ходової частини автомобілів, тракторів
Поверхнєве нагрівання деталей з нагріванням СВЧ (глибина загартованого шару 2-5 мм), низький відпуск (само-відпуск)	Підвищення (порівняно з покращенням) границі витривалості на 40-60%, довговічності у 2-5 разів, границі контактної витривалості на 50-70 %, значне підвищення зносостійкості. Твердість поверхневого загартованого шару 50-60 HRC, серцевини 20-25 HRC	Колінчасті та розподільні вали, напіввісі, зубчасті колеса, карданні вали, поршневі і шарові пальці, шворні
Цементация (глибина науглецюваного шару 0,5-2 мм) або нітроцементация (глибина шару 0,4-1 мм), гартування, низький відпуск	Підвищення (порівняно з покращенням) границі витривалості на 60-100 %, зносостійкості у 3-10 разів, довговічності у 5-10 разів. Твердість поверхневого шару 58-62 HRC, серцевини 28-40 HRC	Зубчасті колеса автомобілів, тракторів, крупні підшипники кочення
Наклеп поверхні (глибина шару 0,1-0,2 мм) після зміцнювальної термічної обробки	Підвищення (порівняно зі станом без наклепу) границі витривалості на 30-50 %, довговічності від 3 до 10 разів	Пружини, ресори, торсіонні вали, напіввісі, колінчасті вали, поворотні кулаки, шатуни

Таблиця 15.5. Оптові ціни сортової конструкційної сталі <sup>\*)</sup>

Марки сталей	Відносна оптова ціна 1т сталевого прокату
Вуглецева якісна 10,15, 20 - 75	1
Хромиста 15Х, 20Х, 40Х, 50Х 12Х13 – 40Х13; 15Х28	1,1 2,9
Хромомарганцева 18ХГТ, 30ХГТ, 20ХГР та ін.	1,25
Хромомолібденова та хромованадієва 15ХМ, 30ХМ, 40ХМФА, 60ХФА та ін.	1,55
Хромонікелева 20ХН, 12ХН3А, 20ХН3А та ін.	1,6
Хромонікельмолібденова 20ХН2М, 18ХН4МА, 40ХН2МА	2,31
Шарикопідшипникова ШХ15	1,52
Аустенітна 12Х18Н10Т 20Х25Н20С2 120Г13	6,0 8,5 2,9

\*) У відносних одиницях порівняно з вуглецевою якісною сталлю

Конкретний матеріал для деталі можна обрати лише після всебічного аналізу умов експлуатації.

2. *Аналіз умов експлуатації.* Вал працює у складнонапруженому стані під дією згинальних, циклічних, динамічних навантажень. Для надійної роботи за таких умов матеріал вала повинен мати високі показники міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ), втомної міцності ( $\sigma_{-1}$ ), пластичності ( $\delta$ ,  $\psi$ ) та ударної в'язкості, особливо роботи розвитку тріщини ( $KC_p$ ), тобто високу конструкційну міцність.

Як відомо, таке поєднання властивостей можна отримати у сталях після гартування з високим відпуском (покращення), при якому формується структура сорбіту відпуску. Чавун для заданих умов роботи непридатний. Отже, слід вибирати сталь з групи покращуваних.

Необхідно підкреслити, що потрібний високий рівень властивостей буде досягнутий тільки за умови наскрізної прогартовуваності. Оскільки діаметр валу 100 мм, прогартовуваність стає визначальним показником – вибрана сталь повинна мати  $D_{кр}$  не менше 100 мм.

Оскільки виріб має працювати при від’ємних температурах, ще однією визначальною вимогою до сталі є низький поріг холодноламкості. Тому, вибираючи марку легованої сталі, слід звернути увагу на елементи, які знижують  $t_{кр}$ .

3. *Вибір марки сталі.* Користуючись табл. Д 3.1, знаходимо марки покращуваних сталей, які прогартовуються в діаметрі 75-120 мм. У таблиці наведені дві марки – 30ХН3А та 40ХН2МА. Обидві сталі леговані нікелем, який, як відомо, знижує  $t_{кр}$ . Порівняємо їх властивості після покращення (табл. 15.6).

Таблиця 15.6. Властивості сталей 30ХН3А та 40ХН2МА після покращення (гартування 820 – 850 °С, олива, відпуск 600 °С) [12]

Сталь	Властивості							
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCU_{+20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$KCU_{+60}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$D_k$ , мм
30ХН3А	780	890	420	21	64	157	130	~ 100
40ХН2МА	860	960	400	20	62	147	73	> 100

З таблиці видно, що необхідний рівень границі текучості забезпечують обидві сталі. Сталь 40ХН2МА має дещо вищі показники міцності при тому ж рівні пластичності. Ударна в’язкість цієї сталі нижча, ніж у сталі 30ХН3А, але її значення при -60 °С залишається достатньо високим, що гарантує запобігання крихкому руйнуванню. Таким чином, як з точки зору міцності, так і порогу холодноламкості, обидві сталі для даної деталі рівнозначні. Але існує ще один визначальний показник – твердість поверхні шийок, яка має бути не нижче 55 HRC для забезпечення зносостійкості.

Зміцнення шийок для середньовуглецевих сталей досягається поверхневим гартуванням з індукційним нагріванням. У сталі 30ХН3А через знижений вміст вуглецю максимальна твердість після гартування з низьким відпуском сягає 49-50 HRC, у сталі ж 40ХН2МА твердість вища – 54-56 HRC. Таким чином, враховуючи такі визначальні показники як механічні властивості, прогартовуваність,

поріг холодноламкості та поверхнева твердість шийок валу, вибираємо для валу екскаватора сталь 40ХН2МА.

4. *Метод виготовлення та попередня термічна обробка заготовки.* Вибір сталі як матеріалу деталі зумовлює і технологію її виготовлення – гаряча обробка тиском. Для нашої деталі раціонально виготовити заготовку куванням або гарячим штампуванням, після чого провести необхідну механічну обробку з припуском на наступні операції термічної обробки. Для поліпшення оброблюваності різанням та отримання рівноважної структури заготовку необхідно піддати нормалізації з високим відпуском або ізотермічному відпалу. Після таких обробок твердість сталі дорівнює 216-236 НВ, що забезпечує задовільну оброблюваність різанням.

5. *Вибір конкретних режимів термічної обробки.* Знаючи критичні точки ( $A_{c1} = 730\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3} = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$ , табл. Д 3.1), призначаємо режими гартування та відпуску.

Температура нагрівання під гартування  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $A_{c3} + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), витримка виробу при цій температурі 1,5 год. (1 хв./мм перерізу), гартувальне середовище – олива. Мікроструктура – мартенсит.

Температура відпуску  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , витримка  $\sim 2$  год., охолодження на повітрі (завдяки молібдену відпускна крихкість відсутня). Структура – сорбіт відпуску.

Технологічні параметри індукційного гартування вибираємо, користуючись табл. 15.7. Товщина загартованого шару 4-5 мм, твердість – 55-57 HRC.

Таблиця 15.7. Взаємозв'язок між частотою струму, товщиною загартованого шару і діаметром виробу

Частота струму, Гц	Глибина нагрівання, мм	Мінімальний діаметр виробу, мм
50	15 – 80	100 – 200
1000	3 – 17	22 – 44
2400	2 – 11	14 – 28
4000	1,5 – 9	11 – 22
8000	1 – 6	8 – 16
10000	0,9 – 5,5	7 – 14
70000	0,3 – 2,5	2,7 – 5,4
400000	0,2 – 1,0	1,1 – 2,2

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: [підручник для вищих навчальних закладів III – IV ступенів акредитації] / Авт. колектив: А.С. Опальчук, Є.Г. Афтандіянц, Л.Л. Роговський, О.Є. Семеновський, М.Б. Календій, О.І. Біловод, І.А. Дудніков; за ред. А.С. Опальчука і О.Є. Семеновського. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2013. – 752 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 648 с.: ил.
3. Волчок І.П. Технологія конструкційних матеріалів. Практикум: [Навч. посібник] / І.П. Волчок, В.М. Плескач. – Запоріжжя: Дике Поле, 2007. – 168 с.
4. Материаловедение: Учебник / Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.Г. Мухина. – 5-е изд. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648с.: ил.
5. Матеріалознавство: [Підручник] / Дяченко С.С., Дощечкіна І.В., Мовлян А.О., Плешаков Е.І. / За ред. проф. С.С. Дяченко. – Харків: ХНАДУ, 2007.- 440 с.
6. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Кн. 1.– М.: Колос, 2008. – 447 с.: ил. – (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
7. Сушко О.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: [Навчальний посібник] / О.В. Сушко, С.В. Кюрчев – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010. – 232 с.: іл.
8. Інженерне матеріалознавство: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / О.М. Дубовий, Ю.О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, С.М. Самохін. – Миколаїв: НУК, 2009. – 444с.
9. Киричок П.О. Основи металознавства і порошкової металургії: [навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл.] / П.О. Киричок, Т.А. Роїк, А.С. Морозов. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 128 с.
10. Матеріалознавство та обробка металів: [Навч. посібник]/ С.Є. Кондратюк, М.В. Кіндрачук, В.О. Степаненко, Ю.Н. Москаленко. – Київ, вид-во «Вікторія», 2000. – 254 с.
11. Котик В.Т. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань: [навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл. за напрямом підготовки «Зварювання»] / В.Т. Котик. – К.:НТУУ «КПІ», 2011. – 184с.

12. Справочник по конструкционным материалам. / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.: под ред. Т.В. Соловьевой. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2008. – 320 с.
13. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: [Навч. посібник]. У 2-х кн., Кн. 1. – Львів: вид-во «Папуга», 2003. – 204 с.
14. Пахолук А. П. Основи матеріалознавство і конструкційні матеріали: [підруч. для студ. вищ. навч. зал.] / А. П. Пахолук, О. А. Пахолук. – Львів: Світ, 2005. – 172 с.
15. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / [навч. посібник для учнів проф. навч. зал.] / Хільчевський В. В., Кондратюк С. Є., Степаненко В. О., Лопатько К. Г. – К.: Либідь, 2002. – 328 с.
16. Структура и свойства подшипниковых сталей / Спектор А. Г., Зельбет Б. П., Киселёва С. А. – М.: Металлургия, 1980. – 264 с.
17. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П. А. Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергосервис, 2001. – 440 с.
18. ДСТУ 2651:2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки (ISO 9001).
19. ДСТУ 7809:2015. Прокат сортовий калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови.
20. ГОСТ 14959-2016.Metalloпродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия.
21. ГОСТ 1414-75. Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия.
22. ГОСТ 1435-99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия.
23. ГОСТ 4543-2016 Metalloпродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.
24. ГОСТ 5950-2000 Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия.
25. ГОСТ 977-88 Отливки стальные. Общие технические условия.
26. ГОСТ 801-78. Сталь подшипниковая. Технические условия.



27. ГОСТ 19265-73. Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия.

28. ГОСТ 3882-74 (ИСО 513-75) Сплавы твердые спеченные. Марки.

29. ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки.

30. ГОСТ 1215-79. Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия.

31. ДСТУ 3925-99 Державний стандарт України. Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки.

32. ДСТУ 3926-99. Чавун з вермікулярним графітом для виливків. Марки.

33. ГОСТ 1585-85 Чугун антифрикционный для отливок. Марки.

34. ГОСТ 15527:2005 Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки (ГОСТ 15527-2004).

35. ГОСТ 17711-93 Сплавы медно-цинковые (латуни) литейные.

36. ГОСТ 5017-2006. Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением. Марки.

37. ГОСТ 613-79 Бронзы оловянные литейные. Марки.

38. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.

39. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Марки.

40. ГОСТ 1583-89 Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.

41. ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови.

42. ГОСТ 2856-79. Сплавы магниевые литейные. Марки.

43. ГОСТ 14957-76. Сплавы магниевые деформируемые. Марки.

44. ДСТУ 2774 – 94. Сплави цинкові антифрикційні. Марки, технічні вимоги та методи випробувань.

45. 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови

46. 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови.

47. ГОСТ 801-79 Сталь подшипниковая. Технические условия.

## ЗАДАЧІ ТА ЗАВДАННЯ ДО РОЗДІЛІВ

### Розділ 1

1. Встановіть відповідність чорних металів групам (згідно класифікації О.П. Гуляєва):

Групи:

1. залізні
2. тугоплавкі
3. уранові
4. рідкоземельні
5. лужноземельні

Метали:

- A. *Na, Ca, K, Li*
- B. *La, Ce, Nd, Pr*
- B. *W, V, Ti, Mo*
- Г. *Fe, Co, Ni, Mn*
- Д. *U, Th, Pu*

2. Встановіть відповідність кольорових металів групам (згідно класифікації О.П. Гуляєва):

Групи:

1. легкі
2. благородні
3. легкоплавкі
4. з послабленими металевими властивостями

Метали:

- A. *Ga, Ge*
- B. *Be, Mg, Al*
- B. *Au, Ag, Os, Ir*
- Г. *Zn, Sn, Pb, Sb*

3. До яких основних властивостей матеріалів відносять: питому вагу, корозійну стійкість, ковкість матеріалів?

4. Призначте наконечник (індентор) та основне навантаження для вимірювання твердості сталюого зразка товщиною 6 мм на приладі Бринеля.

5. Призначте наконечник (індентор) та основне навантаження для вимірювання твердості латунного зразка товщиною 4 мм на приладі Бринеля.

6. Призначте наконечник (індентор) та основне навантаження для вимірювання твердості алюмінієвого зразка товщиною 10 мм на приладі Бринеля.

7. Призначте навантаження та індентор для вимірювання твердості сталюого загартованого зразка на приладі Роквелла. За якою шкалою приладу Ви будете здійснювати вимірювання?

8. Призначте навантаження та індентор для вимірювання твердості сталюого відпаленого зразка на приладі Роквелла. За якою шкалою приладу Ви будете здійснювати вимірювання?

9. Призначте навантаження та індентор для вимірювання твердості зразка твердого сплаву на приладі Роквелла. За якою шкалою приладу Ви будете здійснювати вимірювання?

10. На якому приладі вимірюється твердість тонких поверхневих шарів?

11. Встановіть відповідність типів кристалічної ґратки та металів:

Тип ґратки:

Метали:

1. ОЦК

A. *Ce, Pb, Ni, Pd, Pt, Ir, Cu*

2. ГЦК

B. *Mg, Cd, Re, Os, Zn, Be*

3. ГЦУ

B. *P, K, Na, Li, Ta, W, V*

12. Визначте, які з нижче перерахованих дефектів кристалічної ґратки відносяться до точкових: вакансії, крайові дислокації, міжвузлові атоми, границі зерна.

## Розділ 2

1. З наведених систем двокомпонентних сплавів назвіть ті, що утворюють механічні суміші: Zn-Cd; Ag-Au; Al-Mg; Pb-Sb; Al-Cu.

2. З наведених систем двокомпонентних сплавів назвіть ті, що утворюють розчини заміщення з необмеженою розчинністю: Sn-Bi; Cu-Ni; Nb-Ti; Al-Si.

3. З наведених систем двокомпонентних сплавів назвіть ті, що утворюють розчини заміщення з обмеженою розчинністю: Al-Mg; Sn-Bi; Al-Cu; Pb-Sb.

4. З наведених нижче хімічних сполук нітридами є:  $\text{Fe}_3\text{C}$ ;  $\text{Fe}_2\text{B}$ ;  $\text{TiN}$ ;  $\text{TiCN}$ ;  $\text{Cr}_7\text{C}_2$ ;  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ;  $\text{Fe}_2\text{N}$ ;  $\text{Fe}_3\text{CN}$ ;  $\text{FeB}$ ;  $\text{Cu}_2\text{Al}$ .

5. З наведених нижче хімічних сполук інтерметалідами є:  $\text{Fe}_3\text{C}$ ;  $\text{Fe}_2\text{B}$ ;  $\text{TiN}$ ;  $\text{TiCN}$ ;  $\text{Cr}_7\text{C}_2$ ;  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ;  $\text{Fe}_2\text{N}$ ;  $\text{Fe}_3\text{CN}$ ;  $\text{FeB}$ ;  $\text{Cu}_2\text{Al}$ .

6. З наведених нижче хімічних сполук боридами є:  $\text{Fe}_3\text{C}$ ;  $\text{Fe}_2\text{B}$ ;  $\text{TiN}$ ;  $\text{TiCN}$ ;  $\text{Cr}_7\text{C}_2$ ;  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ;  $\text{Fe}_2\text{N}$ ;  $\text{Fe}_3\text{CN}$ ;  $\text{FeB}$ ;  $\text{Cu}_2\text{Al}$ .

7. Намалуйте діаграму стану сплавів I роду ( $Pb-Sb$ ), побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для будь-якого доєвтектичного сплаву.

8. Намалуйте діаграму стану сплавів I роду ( $Pb-Sb$ ), побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для евтектичного сплаву.

9. Намалуйте діаграму стану сплавів I роду ( $Pb-Sb$ ), побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для будь-якого заєвтектичного сплаву.

10. Побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для сплаву m-n (рис. 1). Визначте кількісний склад фаз для даного сплаву при температурі  $1150^\circ\text{C}$ .

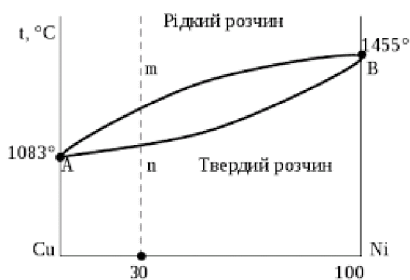


Рис. 1

11. На діаграмі  $\text{Cu-Ni}$  визначте кількісний склад фаз в сплаві за наступними координатами: кількість  $\text{Ni}$  – 60 %; температура  $T = 1300^\circ\text{C}$ .

12. На діаграмі  $\text{Cu-Ni}$  визначте кількісний склад фаз в сплаві за наступними координатами: вміст  $\text{Ni}$  – 70 %; температура –  $T = 1250^\circ\text{C}$ .

### Розділ 3

1. Побудуйте криві охолодження для сплавів з 0,3; 0,8; 1,3; 2,5; 4,3 та 5,2 % С. Опишіть процеси, які відбуваються на різних відрізках кривих охолодження.

2. Які структури та фази в зонах 1, 9, 5 діаграми  $Fe - Fe_3C$  (рис. 2)?

3. Які структури та фази в зонах 2, 7, 4 діаграми  $Fe - Fe_3C$  (рис. 2)?

4. Які структури та фази в зонах 3, 10, 7 діаграми  $Fe - Fe_3C$  (рис. 2)?

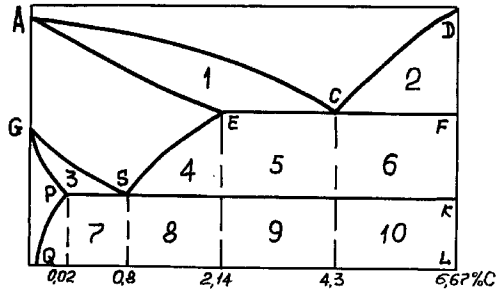


Рис.2

5. Які структури та фази в зонах 6, 8, 9 діаграми  $Fe - Fe_3C$  (рис. 2)?

6. Визначте співвідношення фериту і перліту в сталях з кількістю вуглецю 0,2; 0,45 та 0,6 % вуглецю.

7. Визначте, яку кількість вуглецю містить аустеніт з 1,6 % вуглецю при температурі 900 °C, скористувавшись діаграмою  $Fe - Fe_3C$ .

8. Побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для будь-якого доєвтектичного сплаву на діаграмі  $Fe - Fe_3C$ .

9. Побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для евтектичного сплаву діаграми  $Fe - Fe_3C$ .

10. Побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для заєвтектичного сплаву діаграми  $Fe - Fe_3C$ .

11. Побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для евтектоїдного сплаву на діаграмі  $Fe - Fe_3C$ .

12. Побудуйте криву охолодження та розрахуйте число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса по критичним точкам для заевтектоїдного сплаву на діаграмі  $Fe - Fe_3C$ .

13. На діаграмі  $Fe - Fe_3C$  визначте кількісний склад фаз в сплавах за наступними координатами:

Вміст вуглецю, %	0,5	1	2,14	3,0	3,5	5,0	1,3	1,5
Температура, °C	780	1400	1200	900	800	800	500	800

#### Розділ 4

1. Охарактеризуйте, що означають марки сталей 40 та Ст4 пс. До яких груп вони належать? За якою головною ознакою ці групи відрізняються?

2. Розшифруйте марки сталей Ст1, 10 та У10. До яких груп вони належать?

3. Розшифруйте марки сталей та вкажіть їх призначення: Ст3; Ст4пс.; 20; 45; 60; 65Г; А12; У9; У8А; 08; Ст0, 15Л.

4. Поясніть, у чому полягає особливо шкідливий вплив фосфору на властивості сталей.

5. Яку структури мають при кімнатній температурі наступні вуглецеві сталі: 45; 60Г; У8; У10А; А20; 08; 20Л?

6. Зобразіть схематично структуру доевтектоїдної сталі.

7. Зобразіть схематично структуру евтектоїдної сталі.

8. Зобразіть схематично структуру заєвтектоїдної сталі.
9. Зобразіть схематично структуру аустеніту, фериту.
10. Поясніть, що являють собою сталі 58ПП (55ПП).

## Розділ 5

1. Розшифруйте наступні марки чавунів: СЧ15; ВЧ45; КЧ30-6; СЧ30; КЧ37-12; ВЧ80.
2. Оберіть, яку структуру має ковкий чавун після виливки: ферит + графіт; ферит + цементит; перліт + ледебурит + цементит.
3. Як будуть відрізнятися структура та властивості двох виливків, однакових за формою та розмірами, які відлиті з чавуну однієї марки у металеву та піщано-глинисту форми?
4. За якою ознакою мікроструктури можна визначити, є чавун сірим, ковким чи високоміцним: за величиною графітних включень; за структурою металевої основи; за формою графітних включень.
5. Оберіть марку чавуну з границею міцності  $\sigma_b \geq 300$  МПа для виготовлення корпусу заднього моста вантажівки, що працює в умовах динамічних навантажень.
6. Вкажіть найкращий матеріал для виготовлення колінчастого валу автомобіля: ВЧ60; СЧ21; СЧ45. Обґрунтуйте відповідь.
7. Яку структуру буде мати виливок товщиною 50 мм, виготовлений з чавуну з вмістом 3,5 % С та 3 % Si?
8. Обґрунтуйте вибір марки сплаву з  $\sigma_b \geq 220$  МПа, який здатен гасити вібрації та резонансні коливання, для виготовлення станини ковальського преса, що працює в умовах динамічних навантажень. Яку структуру матиме цей сплав?

9. Які чавуни (з наведених марок) є антифрикційними: СЧ15; ЧВГ300-4; ВЧ60; АЧВ-2; ЧХ22; КЧ80-1,5; АЧК-1; ЧН15Д7; ЧВГ400-4; АЧС-1?

10. Яку структуру матиме виливок товщиною 25 мм, виготовлений з чавуну, де сумарний вміст вуглецю та кремнію дорівнює 5 %?

## Розділ 6

1. Визначте структури, які утворюються в евтектоїдній сталі при охолодженні за режимами 1, 2 (рис. 3, а, б, в). Чим вони відрізняються одна від іншої та з яких фаз складаються?

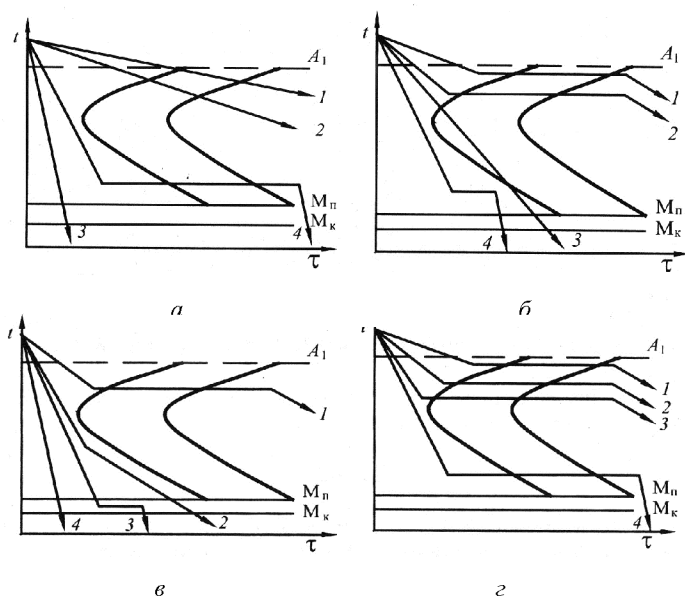


Рис. 3.

2. Визначте структури, які утворюються в евтектоїдній сталі при охолодженні за режимами 3, 4 (рис. 3, а, б, в). Чим вони відрізняються одна від іншої та з яких фаз складаються?



3. Евтектоїдна сталь оброблена за режимами 1, 2 (рис. 3, з). Вкажіть приблизні значення твердості для кожного режиму та поясніть, чому вони відрізняються.
4. Евтектоїдна сталь оброблена за режимами 3, 4 (рис. 3, з). Вкажіть приблизні значення твердості для кожного режиму та поясніть, чому вони відрізняються.
5. Наведіть термічну обробку, яка забезпечує отримання максимальної твердості сплаву: а) відпал; б) гартування з відпуском; в) гартування та старіння; г) гартування.
6. Вкажіть структуру, отриману після найбільшої швидкості охолодження: а) тростит; б) сорбіт; в) перліт; г) мартенсит.
7. Поясніть, в чому полягає перегрів сталі, як він впливає на властивості. Запропонуйте режим виправлення перегріву сталі, який виник у результаті попередньої обробки (після кування).
8. Яку термічну обробку застосовують для усунення наклепу після холодної деформації: а) відпал; б) гартування з відпуском; в) гартування зі старінням; г) гартування.
9. Дві марки сталі з приблизно однаковим вмістом вуглецю нагріті до однієї й тієї ж температури (вище критичної точки  $A_{n_3}$ ). Після охолодження в одній сталі розмір зерна відповідає другому балу, в другій – шостому. У чому полягає причина такої різниці?
10. Вкажіть, в якій зі сталей (40, 60, У8) буде отримана найбільша пластичність після гартування.

## Розділ 7

1. Призначте режим гартування (температуру нагрівання, час витримки, охолоджувальне середовище) для виробу зі сталі 45 діаметром 30 мм. Обґрунтуйте вибір.

2. Поясніть, який вид відпалу з нижченаведених слід проводити для поковок зі сталі 40 після гарячої обробки тиском: а) повний; б) неповний; в) рекристалізаційний; г) нормалізацію.
3. Призначте та обґрунтуйте режим гартування (температуру нагрівання, час витримки, охолоджувальне середовище) для виробу зі сталі У12 діаметром 20 мм.
4. Виріб діаметром 500 мм виготовлений методом лиття зі сталі 20Л. Призначте режим повного відпалу та зобразіть цей режим графічно.
5. Яку термічну обробку слід рекомендувати для шестерні зі сталі 20: а) поверхнєве гартування СВЧ; б) цементация; в) азотування; г) цементация, гартування та відпуск низький. Поясніть вибір.
6. Після гартування отримана нижча твердість, ніж має бути за технічними умовами. Поясніть, якими можуть бути причини цього та що треба зробити для отримання необхідної твердості.
7. Після гартування сталь має структуру мартенсит + цементит. Вкажіть орієнтовно склад сталі та режим гартування (температуру нагрівання, охолоджувальне середовище).
8. До якої температури під гартування з нижченаведених слід нагріти деталі зі сталі 40: 700 °С, 850 °С чи 1000 °С? Який вибір є правильним? Обґрунтуйте відповідь.
9. В якій сталі більша імовірність присутності залишкового аустеніту в структурі після гартування: в сталі У12 чи ХВСГ, поясніть чому.
10. Деталі проведено гартування з наступним відпуском, після яких твердість виробу виявляється меншою, ніж необхідна. Поясніть, в чому полягає причина цього дефекту та яким чином можна одержати необхідну твердість.
11. Після гартування дві сталі мають структуру мартенситу, але різну твердість: у однієї – 25 HRC; у другої – 58 HRC. Поясніть причини такої різної твердості.

**12.** Які з нижченаведених сталей мають найнижчу та найвищу прогартовуваність і чому: 60С2А; 40ХГНР; 85; 20Х2Н4ВА.

**13.** Який вид відпуску слід використовувати для ресор: а) низький (200 °С); високий (550-650 °С); середній (350-500 °С). Яку структуру одержують після такого відпуску?

**14.** При гартуванні виробу з вуглецевої сталі у воді виникли тріщини. Що можна запропонувати для зменшення імовірності утворення тріщин?

**15.** Валик зі сталі 40Х діаметром 15 мм та довжиною 50 мм треба загартувати. Який вид браку найімовірніший при гартуванні виробів з великим відношенням довжини до перерізу та як запобігти його виникненню?

## **Розділ 8**

**1.** Яка термічна обробка потрібна після поверхневого гартування: а) низькотемпературний відпуск; б) середньотемпературний відпуск; в) високотемпературний відпуск; г) не потрібна.

**2.** Обґрунтуйте, які з наведених сталей можна використовувати для виробів, що піддають поверхневому гартуванню: 40Х; 18 ХГТ; 15Х; 45; 12Х2Н4ВА.

**3.** Визначте необхідну товщину загартованого шару при поверхневому гартуванні зубчастого колеса з модулем 7 мм.

**4.** З наведених марок сталі виберіть ті, що використовуються для цементації та азотування з метою одержання високої поверхневої твердості: 40; 38Х2МЮА; 20; 12ХН3А; У10; ХН.

**5.** Яку термічну обробку слід застосувати для елементів кермового керування зі сталі 35ХМЮА: а) цементацію, гартування та низький відпуск; б) азотування при 500-600 °С з попереднім термічним покращенням; в) покращення + гартування СВЧ з низьким відпуском; г) азотування з наступним термічним покращенням.

6. Для виробу, що працює при температурах  $\sim 450^\circ\text{C}$ , призначте марку сталі та режим ХТО, який забезпечує високу зносостійкість. Обґрунтуйте відповідь.
7. Призначте технологію нітроцементзації виробу, виготовленого зі сталі 20ХГМ. Зобразіть цей процес графічно.
8. Який спосіб хіміко-термічної обробки з перелічених є найбільш перспективним для шестерень з низьковуглецевої легованої сталі 20Х: а) цементация; б) азотування; в) низькотемпературна нітроцементация; г) високотемпературна нітроцементация.
9. Який спосіб дифузійного насичення слід рекомендувати для підвищення жаростійкості (окалиностійкості) клапанів та інших деталей автомобілів: а) хромування; б) борування; в) алітування; г) силіціювання. Обґрунтуйте вибір.
10. Яким чином можна зменшити негативний вплив знеуглецювання при термічній обробці ресор на експлуатаційні властивості: а) травленням; б) дробоструменевим наклепом; в) гідропіскоструменевим очищенням.

## Розділ 9

1. Сталі 40 та 40Х були покращені. Поясніть, в чому полягає така обробка та чи буде відрізнятися твердість цих сталей, якщо кінцева операція термічної обробки обох сталей здійснювалася при однаковій температурі.
2. Вкажіть, які з нижченаведених легуючих елементів є карбідоутворюючими: *Mo, Si, Ni, V, Al, Cu, Co, Ti, W*.
3. Яким елементом слід легувати сталь для виробу, що працює при температурі  $-60^\circ\text{C}$ ? Наведіть приклад такої марки сталі.
4. Сталь 35Г2 після гартування та відпуску при  $T = 550^\circ\text{C}$  була охолоджена з цієї температури з різною швидкістю: після

оохолодження у воді ударна в'язкість сталі склала  $72 \text{ Дж/см}^2$ , а після оохолодження на повітрі –  $30 \text{ Дж/см}^2$ . Поясніть причину цього явища.

5. Призначте: марку сталі, яку цементують, та режим термічної обробки для важконавантаженої шестерні. Поясніть вибір.

6. Призначте марку сталі та режим термічної обробки для кульки підшипника діаметром 30 мм. Обґрунтуйте відповідь.

7. Виберіть марку сталі, з якої можна виготовити пружину, з наведених нижче. Призначте режим термічної обробки та обґрунтуйте відповідь.

Марки сталей: 40Х; 65; Р6М5; 20Х2Н4ВА.

8. Призначте сталь та режим термічної обробки для ножа.

9. Виберіть сталь та призначте режим термічної обробки для виготовлення протяжки діаметром більше 25 мм.

10. Призначте оптимальний режим термічної обробки сталі Р9 на твердість 64 HRC: а) гартування від  $1230^\circ\text{C}$  в оливі та середній відпуск; б) гартування від  $1230^\circ\text{C}$  в оливі та низький відпуск; в) гартування від  $1230^\circ\text{C}$  в оливі та високий відпуск при  $550^\circ\text{C}$ ; г) гартування від  $1230^\circ\text{C}$  в оливі та трикратний відпуск при  $550^\circ\text{C}$ . Обґрунтуйте відповідь.

## Розділ 10

1. Оберіть з нижченаведених мідний сплав (латунь) для трубчастих елементів радіаторів: а) Л60; б) Л80; в) БрО10; г) ЛЦ40С. Обґрунтуйте відповідь.

2. Порекомендуйте марку бронзи, яка б забезпечила отримання найбільш щільних виливків для втулок: а) БрО10; б) ЛЦ40Мц3А; в) БрАМц9-2.

3. Вкажіть деформівний алюмінієвий сплав, який зміцнюється термічною обробкою, з найбільшими характеристиками міцності: а) Д16; б) В95; в) АЛ20; г) АК6.
4. Виберіть сплав для головок блоків двигунів: АК4; АЛ4; В95.
5. Порекомендуйте найбільш корозійностійкий сплав для умов морського клімату: на основі міді; на основі алюмінію; на основі титану. Обґрунтуйте відповідь.
6. У яких легких сплавів може бути отримана найбільша питома міцність: а) алюмінієвих; б) магнієвих; в) берилієвих; г) титанових.
7. Оберіть з нижченаведених марку латуні з вмістом 30 % цинку: а) БрС30; б) ЛЦ20А6Ж4; в) Л70; г) ЛЦ30С.
8. Мельхіор – це сплав: а) міді з алюмінієм; б) алюмінію з нікелем; в) міді з нікелем; г) алюмінію з нікелем.
9. У сплаві ЖГр2Д2,5 міститься 2,5 %: а) графіту; б) міді; в) заліза.
10. Оберіть, який із запропонованих сплавів слід рекомендувати для вкладнів автотранспортних підшипників, який забезпечив би мінімальний знос шийок валу: а) АСМ; б) ЦАМ5-10; в) В83; г) Б16.

## Розділ 11

1. Який з нижченаведених хімічних елементів має найвищу провідність: мідь (Cu); алюміній (Al); срібло (Ag); натрій (Na).
2. Індукція при зменшенні напруженості поля до нуля дорівнює: а)  $H_c$ ; б)  $B_r$ ; в) нулю.
3. З наведених марок виберіть ніхроми: Х13Ю4; Х15Н60; МНМц 3-12; Х27Ю5А; Х20Н80.
4. Оберіть литий сплав для постійних магнітів (алніко, магніко): а) 38ХМЮА; б) ЕХ9К15М12; в) ЮНДК8.

5. Пермалой – це сплав: а) заліза з нікелем; б) заліза з магнієм; в) заліза з алюмінієм.
6. Оберіть матеріал для нагрівальних елементів для робочих температур до 1100 °С: а) Х12Ю5; б) Х20Н80; в) МНМц23-05.
7. При надлишку металу напівпровідникові матеріали мають тип провідності: а) електронний; б) дірочний; в) змішаний.
8. До сплавів з заданим коефіцієнтом теплового розширення відносяться сплави: ЕХ5К5; 42Н; 33НК; ЮНДК15; 29НК; 79НМ; 38ХМЮА.
9. При надлишку металоїду напівпровідникові матеріали мають тип провідності: а) електронний; б) дірочний; в) змішаний.
10. Надпровідники – це матеріали, які мають питомий електричний опір, Ом·м: а)  $10^{-8} - 10^{-5}$ ; б)  $10^{-5} - 10^8$ ; в)  $10^8 - 10^{16}$ .

## Розділ 12

1. Виберіть необхідну температуру спікання порошкових матеріалів на основі заліза і графіту: а) 1000 - 1050 °С; б) 1100 - 1200 °С; в) 850 - 950 °С.
2. Наведіть класифікацію (функціональні категорії) порошкових матеріалів за видами застосування.
3. Виберіть з нижченаведених твердий металокерамічний сплав для обробки сталі: а) Р6М5; б) ВК6; в) МК5; г) Т15К6; д) 9ХС.
4. Призначте з запропонованого ряду конструкційних порошкових матеріалів на чорнометалевій основі той, який застосовується для абразивностійких та важконавантажених деталей: Ж20Х2-76; Ж30Х7-76; Ж10-66; Ж50НЗД2-66.
5. Оберіть металокерамічний антифрикційний матеріал для умов сухого тертя: а) Р9; б) ЖГр-1; в) МК-5; г) Т15К6.

## Розділ 13

1. Поліетилен, фторопласт, полістирол, органічне скло відносять до полімерів: а) термореактивних; б) термопластичних; в) композиційних.
2. Для виготовлення магнітних екранів, п'єзоелектричних перетворювачів, конденсаторів низької частоти застосовується кераміка: а) конденсаторна; б) п'єзоелектрична; в) феритова.
3. У якості ізоляційного паперу для високочастотних конденсаторів використовують: а) ситали; б) лускате скло; в) оксидне скло.
4. Матеріали, у яких під дією механічної енергії виникає поляризація називаються: а) установочна кераміка; б) конденсаторна кераміка; в) п'єзоелектрична кераміка.
5. Вулканізаторами при отриманні гуми є: а) сірка та графіт; б) сірка та каптакс; в) сірка та металевий натрій.
6. Вкажіть основу клею, яка забезпечує найбільшу конструкційну міцність з'єднань металевих елементів: а) кремнійорганічна; б) епоксидна; в) фенолоформальдегідна.
7. З нижченаведених виберіть м'які породи деревини: сосна, дуб, липа, ялина, граб, горіх, модрина, вільха; груша.
8. Оберіть спосіб отримання фанери: а) лушення з суцільної деревини; б) струганням з деревини; в) пресуванням заготовок; г) склеюванням шарів шпону.
9. Склокристалічний матеріал, який отримують за допомогою контрольованої кристалізації це: а) оксидне скло; б) ситал; в) лускате скло.



## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	3
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1. АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА І КРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ</b> .....	5
1.1 Короткий історичний огляд.....	5
1.2 Загальна характеристика металів.....	6
1.3 Класифікація та основні властивості металів.....	7
1.4 Атомно-кристалічна будова металів.....	9
1.5 Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри.....	10
1.6 Будова реальних кристалів. Дефекти кристалічної будови.....	12
1.7 Основи теорії кристалізації.....	16
1.8 Будова сталевих зливків.....	20
1.9 Криві кристалізації. Криві охолодження.....	21
<b>РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ СПЛАВІВ</b> .....	24
2.1 Основні поняття та визначення.....	24
2.2 Фази у сплавах. Поняття про механічні суміші, тверді розчини, хімічні сполуки.....	25
2.3 Криві кристалізації сплавів. Діаграма рівноважного стану.....	29
2.4 Методи побудови діаграм стану.....	30
2.5 Діаграма стану сплавів, в яких утворюється механічна суміш (I роду).....	31
2.6 Діаграма стану сплавів, у яких утворюється необмежений твердий розчин (II роду).....	35
2.7 Діаграма стану сплавів, в яких утворюються обмежені тверді розчини.....	36
2.8 Діаграма стану сплавів, в яких утворюються стійкі хімічні сполуки.....	38
2.9 Взаємозв'язок між властивостями сплавів та їх діаграмами стану (закон Курнакова – Жемчужного).....	39
<b>РОЗДІЛ 3. ДІАГРАМА «ЗАЛІЗО – ВУГЛЕЦЬ»</b> .....	42
3.1 Властивості чистого заліза. Алотропія.....	42
3.2 Фази у сплавах системи залізо-вуглець.....	43
3.3 Діаграма стану залізо-цементит (Fe – Fe <sub>3</sub> C).....	45
3.4 Аналіз сплавів.....	49

3.5 Правило фаз.....	50
3.6 Правило відрізків.....	52

## **РОЗДІЛ 4. ВУГЛЕЦЕВІ СТАЛІ.....55**

4.1 Вплив вуглецю та постійних домішок на властивості сталей.....	55
4.2 Структури відпалених вуглецевих сталей.....	58
4.3 Класифікація, маркування та застосування вуглецевих сталей.....	59
4.4 Вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості.....	60
4.5 Вуглецеві конструкційні якісні сталі.....	62
4.6 Автоматні сталі.....	64
4.7 Вуглецеві інструментальні сталі.....	65
4.8. Котельні сталі.....	67

## **РОЗДІЛ 5. ЧАВУНИ.....68**

5.1 Структури білих чавунів.....	68
5.2 Структури сірих чавунів.....	70
5.3 Вплив хімічного складу чавунів та швидкості охолодження на їх структуру.....	72
5.4 Ковкий чавун.....	74
5.5 Високоміцний чавун.....	76
5.6 Чавуни з вермікулярним графітом, антифрикційні та спеціальні чавуни.....	79

## **РОЗДІЛ 6. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ.....81**

6.1 Поняття термообробки.....	81
6.2 Класифікація видів термічної обробки (по А.А. Бочвару).....	82
6.3 Перетворення при нагріванні сталі (процес аустенізації).....	82
6.4 Чотири основні перетворення в сталі.....	84
6.5 Перше перетворення: П → А. Дійсне і спадкове зерно.....	85
6.6 Перетворення в сталі при охолодженні (друге перетворення). Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту.....	87
6.7 Мартенситне перетворення (третє перетворення).....	92
6.8 Вплив легувальних елементів на стійкість переохолодженого аустеніту.....	94
6.9 Перетворення при відпуску (четверте перетворення).....	95

## **РОЗДІЛ 7. ОСНОВНІ ВИДИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ.....97**

7.1 Відпал.....	97
7.2 Нормалізація.....	100

7.3 Гартування.....	101
7.4 Способи гартування сталі.....	106
7.5 Відпуск.....	108
7.6 Старіння.....	113
7.7 Загартовуваність та прогартовуваність сталі.....	114
7.8 Обробка сталі холодом.....	116
7.9 Термомеханічна обробка.....	117
7.10 Дефекти, які виникають при термообробці, методи боротьби з ними.....	120

## **РОЗДІЛ 8. ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....123**

8.1 Поверхнєве гартування.....	123
8.2 Об'ємно-поверхнєве гартування.....	129
8.3 Хіміко-термічна обробка.....	129
8.4 Зміцнення поверхні пластичним деформуванням.....	140

## **РОЗДІЛ 9. ЛЕГОВАНІ СТАЛІ.....144**

9.1 Класифікація легованих сталей.....	144
9.2 Маркування легованих сталей та сплавів.....	145
9.3 Теорія легування.....	147
9.4 Конструкційні сталі.....	154
9.5 Інструментальні сталі.....	158
9.6 Спеціальні сталі.....	163

## **РОЗДІЛ 10. СПЛАВИ НА ОСНОВІ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ.....171**

10.1 Сплави на основі алюмінію.....	171
10.2 Сплави на основі міді.....	179
10.3 Антифрикційні матеріали.....	184
10.4 Сплави на основі титану.....	189
10.5 Сплави на основі магнію.....	193
10.6. Цинкові сплави та їх використання.....	196
10.7. Припої.....	197
10.8 Легкоплавкі сплави.....	198

## **РОЗДІЛ 11. СТАЛІ І СПЛАВИ З ОСОБЛИВИМИ ФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ.....200**

11.1 Сплави високого електричного опору.....	200
11.2 Матеріали для термопар.....	202
11.3 Магнітні сталі та сплави.....	203

11.4. Сплави з заданим коефіцієнтом теплового розширення.....	210
11.5. Метали та сплави високої електричної провідності.....	213
11.6. Сплави з ефектом пам'яті форми.....	217
11.7. Аморфні металеві матеріали.....	218
11.8. Нанокристалічні матеріали.....	219

## **РОЗДІЛ 12. ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ.....225**

12.1 Конструкційні порошкові матеріали.....	226
12.2 Призначення і категорії за видами застосування.....	227
12.3 Конструкційні порошкові матеріали.....	228
12.4 Пористі порошкові матеріали.....	237
12.5 Триботехнічні пористі матеріали.....	244
12.6 Електротехнічні порошкові матеріали.....	248
12.7 Порошкові матеріали для ядерної енергетики.....	253

## **РОЗДІЛ 13. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ТА НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ. ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ.....256**

13.1 Пластмаси.....	257
13.2 Кераміка.....	260
13.3 Скло.....	263
13.4 Гумові матеріали.....	265
13.5 Клеї та герметики.....	267
13.6 Лакофарбові матеріали.....	270
13.7. Деревина.....	274

## **РОЗДІЛ 14. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ ЗА КОРДОНОМ.....279**

14.1 Принципи маркування сталей за кордоном.....	279
14.2 Маркування, хімічний склад та застосування іноземних чавунів.....	282
14.3 Маркування іноземних легованих сталей та чавунів.....	285
14.4 Маркування іноземних кольорових металів та сплавів.....	288

## **РОЗДІЛ 15. ВИБІР І ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ТЕРМІЧНЕ ЗМІЦНЕННЯ.....298**

15.1 Загальні принципи вибору матеріалів для деталей машин.....	299
15.2 Форма, розміри, технологія виготовлення та матеріаломісткість деталей.....	300
15.3 Механічні властивості матеріалів, надійність і довговічність виробів.....	301

15.4 Економічні аспекти вибору матеріалів.....	304
15.5 Заходи з охорони довкілля й утилізації відходів.....	306
15.6 Класифікація деталей машин за умовами експлуатації та вибір матеріалів.....	308
15.7 Матеріали деталей, що зазнають тертя.....	308
15.8 Сталі для виробів, що піддають поверхневому гартуванню.....	309
15.9 Сталі для деталей, що цементують та нітроцементують.....	311
15.10 Сталі для виробів, що азотують.....	311
15.11 Матеріали деталей, що не працюють в умовах тертя.....	313
15.12 Сталі для пружних елементів.....	313
15.13 Сталі для відповідальних важконавантажених виробів, що працюють в складно-напруженому стані.....	314
15.14 Попередня обробка заготовок.....	315
15.15 Приклад вибору матеріалу та призначення термічної обробки деталі.....	316

<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>321</b>
-------------------------------	------------

## **ЗАДАЧІ ТА ЗАВДАННЯ ДО РОЗДІЛІВ**

Розділ 1.....	324
Розділ 2.....	325
Розділ 3.....	327
Розділ 4.....	328
Розділ 5.....	329
Розділ 6.....	330
Розділ 7.....	331
Розділ 8.....	333
Розділ 9.....	334
Розділ 10.....	335
Розділ 11.....	336
Розділ 12.....	337
Розділ 13.....	338

<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>344</b>
---------------------	------------